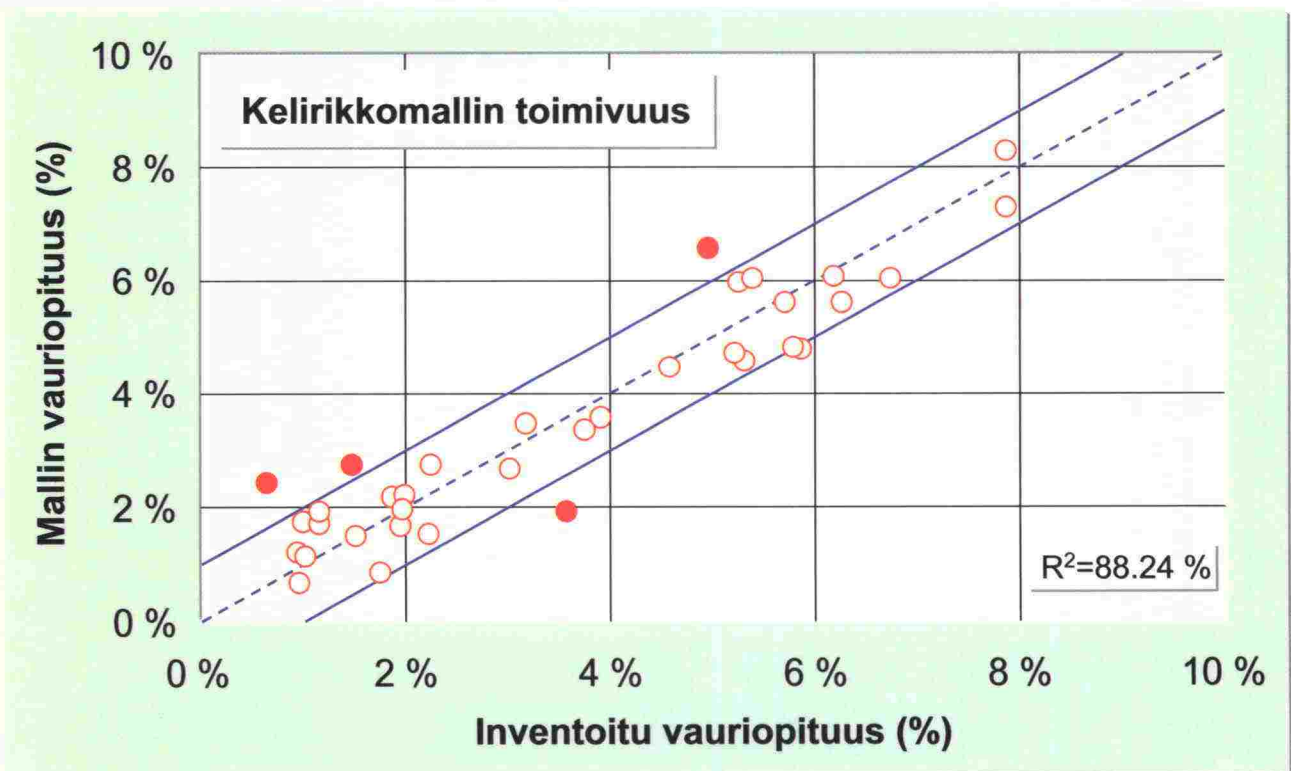


Teuvo Rynnänen, Jouko Belt, Esko Ehrola

Sorateiden runkokelirikko ja kelirikon vaikeuden ennustaminen

Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito -tutkimusohjelma

Tiehallinnon selvityksiä 46/2003



Teuvo Ryyänen, Jouko Belt, Esko Ehrola

Sorateiden runkokelirikko ja kelirikon vaikeuden ennustaminen

Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito -tutkimusohjelma

Tiehallinnon selvityksiä 46/2003

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-128-2
TIEH 3200833

Verkkoversio (www.tiehallinto.fi/julkaisut) pdf
ISSN 1459-1553
ISBN 951-803-129-0
TIEH 3200833-v

Edita Prima Oy
Helsinki 2003

Julkaisua myy/saatavana:
Tiehallinto, julkaisumyynti
faksi 0204 22 2652
s-posti julkaisumyynti@tiehallinto.fi



TIEHALLINTO
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 22 11

Teuvo Ryyänen, Jouko Belt, Esko Ehrola. Sorateiden runkokelirikko ja kelirikon vaikeuden ennustaminen. Helsinki 2003. Tiehallinto. Tiehallinnon selvityksiä 46/2003, 69 s. ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-128-2, TIEH 3200833.

Asiasanat: soratiet, kelirikko, vauriot, rajoitukset, korjaus, toimenpiteet
Aiheluokka: 70

TIIVISTELMÄ

Pohjoisilla alueilla esiintyy sorateilla yleisesti runkokelirikkoa. Painorajoituksia käytetään vähentämään runkokelirikon aiheuttamia haittoja kriittisenä sulamisaikana. Painorajoitukset suojaavat tietä vaurioitumiselta, mutta haittaavat samalla erityisesti raskaan liikenteen kuljetuksia.

Tutkimuksen tavoitteina oli selvittää Minnesotan painorajoituskäytäntöä, tarkastella erilaisten runkokelirikon korjaustapojen pitkäaikaistoimivuutta, täydentää "Soratieiden runkokelirikko" -raportin [Belt ym., 1999] aineistoa ja muodostaa entistä tarkempi runkokelirikon ennustemalli. Raportissa tarkastellaan myös painorajoitusten asettamista hoitourakoinnin näkökulmasta sekä esitetään menettely, jonka avulla hoitourakka-alueen painorajoitusten määrää voidaan ennakoida.

Minnesota -tutkimusten päämääränä on ollut painorajoitusajan yksinkertainen mutta tarkka määrittäminen. Alkamisajankohta määritetään mitattujen ilman lämpötilojen ja kolmen vuorokauden ennusteen avulla. Painorajoitusten poistamisajankohta määritellään pudotuspainolaitemittausten taipumaparametrien ja säätekijöiden avulla. Menettely sopisi myös Suomen olosuhteisiin edellyttäen, että pohjoinen sijaintimme otetaan huomioon.

Suomen sää- ja runkokelirikkoinventointitiedot olivat vuosilta 1996 - 2002. Rankimman vuoden 1998 runkokelirikkopituus oli 1 538 km ja helpoimman 465 km (v. 2002), mitkä edustavat 5.5 ja 1.7 prosenttia sorateiden kokonaispituudesta. Teittäin tarkasteltuna keskimäärin 39 % Suomen sorateista kärsi runkokelirikosta.

Kaikki kelirikon kunnostustoimenpiteet vähentävät runkokelirikkoa. Paras vaikutus on raskaalla (A) runkokelirikkokorjauksella, joka vähentää kelirikkopituutta yli 75 % toimenpiteen iästä riippumatta. Keskiraskas runkokelirikkokorjaus (B) vähentää kelirikkopituutta aluksi 67 %, mutta vaikutus heikkenee nopeasti. Kevyellä runkokelirikkokorjauksella (C) on heikohko vaikutus.

Runkokelirikkopituutta ennustettiin lämpötiloista ja sademääristä lasketuilla tekijöillä. Säätekijät eivät yksinään riittäneet kuvaamaan runkokelirikon esiintymistä, sillä myös teiden alusrakenne, ikä ja rakenne vaikuttavat runkokelirikkomääriin. Tämän takia yhtenä selittävänä tekijänä käytettiin alueen keskimääräistä vauriopituutta. Tulokseksi saatiin kaksi mallia: Syksyn tekijöistä muodostettu malli ($R = 70.9\%$) ja syksyn ja kevään tekijöistä muodostettu malli ($R = 88.3\%$). Syksyn malli sopii ennustamistarkoituksiin, koska sen tekijät ovat tiedossa ennen ennustettavaa kevättä. Merkittävimmät selittävät tekijät ovat routaantumisaika sekä osa-alueen vauriopi-tuuden mediaani.

Ennustemallien perusteella luotiin menettely, jonka avulla voidaan ennakoida vuosittainen hoitourakka-alueen painorajoituspituus. Menettely on kaksivaiheinen: Aluksi määritetään 30 vuoden routaantumisaikojen perusteella helppo, keskimääräinen ja vaikea runkokelirikkokevät. Ennustettavan kevään rankkuus saadaan vertaa-

malla syksyn routaantumisaikaa pitkän ajan routaantumisaikojen jakaumaan. Toisessa vaiheessa määritetään hoitourakka-alueen runkokelirikkoinventointeihin perustuvien painorajoituspituuksien jakauma ja jaetaan pituudet luokkiin lyhyt, keskimääräinen ja pitkä. Tulevan kevään hoitourakka-alueen painorajoituspituusluokka valitaan ennustetun runkokelirikon rankkuuden perusteella.

Runkokelirikkoennuste koskee aina tiettyä aluetta eikä sillä voida ennustaa yksittäisen tien tai tieosan runkokelirikkopituutta. Ennustemalleja voidaan edelleen kehittää tarkentamalla osa-aluejakoa, käyttämällä selittävinä muuttujina saatavilla olevan veden määrää (esimerkiksi pohjaveden pinnan korkeus) sekä käyttämällä kaikilla osa-alueilla mittauksiin perustuvia muuttujia.

Keywords: gravel roads, thaw weakening, damages, load restrictions, repair methods

ABSTRACT

Structural thaw-weakening is a common phenomenon in the gravel roads of northern regions. During critical periods of thawing, load restrictions are used to reduce the disadvantages caused by structural thaw-weakening. Load restrictions protect the road from damage, but at the same time they cause hindrance particularly to heavy goods transport.

The aim of this study was to analyse the load restriction practice in Minnesota, to investigate the long-term usefulness of different improvement methods of structural thaw-weakening, to extend the report of Belt et al, 1999: Soratiestön runkokelirikko, 'Structural thaw-weakening in the gravel roads', and to create a more accurate structural thaw-weakening forecasting model. In addition, this report considers the placement of load restrictions from the point of view of maintenance contracting and introduces a procedure by means of which the quantity of load restrictions in a maintenance contract area may be anticipated.

The aim of Minnesota research was a simple but accurate method to predict the forthcoming load restriction period. The starting time of the period is determined by means of air temperature measurements and a three-day forecast. The removal time of load restrictions is determined by means of the deflection parameters from falling weight deflectometer measurements and weather factors. The above practice would seem applicable to Finland given that our northern location is taken into account.

The Finnish data on weather and structural thaw-weakening were from years 1996-2002. The extent of structural thaw-weakening in the roughest year 1998 was 1 538 km while that of the easiest year 2002 was 465 km, which represent 5.5 and 1.7 % respectively of the total length of gravel roads. On average 39 % of Finland's gravel roads were affected by structural thaw-weakening.

All improvement methods reduce the volume of structural thaw-weakening. The most effective result is gained by the heavy improvement method A, which reduces the extent of structural thaw-weakening by 75 % regardless of the time elapsed since the improvement. The intermediate improvement method B reduces the extent of thaw-weakening initially by 67 % but the effect weakens rapidly. The light improvement method C only has a slight effect.

The extent of structural thaw-weakening was forecast by means of factors worked out from temperatures and precipitation. Weather factors alone did not give sufficient data to forecast the occurrence of structural thaw-weakening as the quantities of structural thaw-weakening are also influenced by the subgrade, age and structure of the roads. Therefore, the average extent of weakening was used as one of the explanatory factors. As a result, two models were obtained: the model formed by autumn factors ($R=70.9\%$) and the model formed by autumn and spring factors ($R=88.3\%$). The autumn model is suitable for forecasting purposes as its factors are known before the foreseeable spring. The most significant factors are the elapsed time for the freezing and the median of the weakened length of road in the sub area.

On the basis of these forecasting models was created a procedure by means of which the yearly extent of load restrictions can be forecast for the maintenance contract area. The procedure takes place in two stages: First, on the basis of 30-year data for freezing times, an easy, medium and rough spring for structural thaw-weakening is defined. The level of roughness is calculated by comparing the autumn freezing time to the distribution of long-term freezing times. At the second stage, the distribution of load restriction extents based on structural thaw-weakening inventory data in that maintenance contract area is defined, and the ranges are classified as short, medium- length and long. The classification of load restriction in that maintenance contract area for the coming spring is chosen on the basis of the forecast roughness of structural thaw-weakening.

The forecast for structural thaw-weakening is only applicable to a certain area and it cannot be used to forecast the extent of structural thaw-weakening of one particular road or part of road. The forecasting models may be further developed by specifying more accurate sub areas, by using the ground water level as explanatory factors as well as by using variables based on measurements in every sub area.

ALKUSANAT

Tiehallinnossa käynnistettiin loppuvuonna 2002 "Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito" -tutkimusohjelma. Tutkimusohjelman yhtenä kohtana on "Kelirikkoisten teiden suunnittelun ja painorajoitusten asettamisen perusteet". Perusteita on tehnyt kolme eri tahoa: Roadscanners, Oulun yliopisto ja VTT. Oulun yliopiston tehtävänä on ollut selvittää sorateiden runkokeliriksoon ja sen ennustamiseen liittyviä asioita. Tehtävä liittyy läheisesti vuonna 1999 julkaistuun "Soratiestön runkokelirikko" -selvitykseen (Tielaitoksen tutkimuksia 1/1999).

Työtä on ohjannut projektiryhmä, johon kuuluvat

Lasse Weckström,	Tiehallinto, puheenjohtaja
Tapani Pöyry,	Tiehallinto
Timo Saarenketo,	Roadscanners
Esko Ehrola,	Oulun yliopisto
Jouko Belt,	Oulun yliopisto
Jouko Törnqvist,	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
Seppo Saarelainen,	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
Martti Perälä,	Plaana Oy
Aarno Valkeisenmäki,	Tieliikelaitos, sihteeri

Oulun yliopiston rakentamisteknologian tutkimusryhmässä työhön ovat osallistuneet professori Esko Ehrola, projektipäällikkö Jouko Belt ja tutkija Teuvo Ryynänen.

Oulussa 13.10.2003

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	13
2	PAINORAJOITUKSET MINNESOTASSA	15
2.1	Johdanto	15
2.2	Kevään painorajoitusmenettely	17
3	RUNKOKELIRIKON ESIINTYMINEN	21
3.1	Tausta	21
3.2	Lähtöaineistot	21
3.21	Runkokelirikkotietokanta	21
3.22	Säätiedot	22
3.23	Otosalueiden teiden valinta	23
3.3	Aineiston käsittely	26
4	RUNKOKELIRIKON ENNUSTAMINEN	33
4.1	Muuttujat	33
4.2	Mallit	34
4.21	Kevään ja syksyn tekijöistä muodostettu malli	34
4.22	Parannettu kevään ja syksyn tekijöistä muodostettu malli	37
4.23	Syksyn tekijöistä muodostettu malli	39
4.24	Malli eri vaurioluokille	40
4.3	Kuivatuspuutteet ja runkokelirikko	41
4.4	Ehdotus runkokelirikon ennustamiseksi	42
4.41	Aluejako ja muuttujat	42
4.42	Parannetun kevään ja syksyn tekijöistä muodostetun mallin toiminta osa-alueilla	44
4.43	Syksyn tekijöistä muodostetun mallin toiminta osa-alueilla	46
5	KUNNOSTUSTOIMENPITEIDEN VAIKUTUS	48
5.1	Aineisto ja menetelmä	48
5.2	Kunnostustoimenpiteiden vaikutus runkokelirikkoon	50
5.3	Kunnostustoimenpiteiden vaikutusaika	51
6	PAINORAJOITUSTEN ASETTAMINEN HOITOURAKOINNIN NÄKÖKULMASTA	54
6.1	Lähtökohdat	54
6.2	Painorajoitusten vaikutukset ja niiden arviointi	54
6.3	Alueen sallittu painorajoitusten laajuus	56
6.31	Periaatteita	56
6.32	Kevään kelirikon rankkuuden luokittelu ja ennustaminen	58
6.33	Painorajoitusmäärät eri kelirikon vaikeusluokissa	60
6.34	Painorajoitusten asettamis- ja poistamisajankohta	63
7	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	66

1 JOHDANTO

Pohjoisilla alueilla, kuten pohjoismaissa, USA:n pohjoisosissa sekä Kanadassa esiintyy yleisesti runkokelirikkoa. Runkokelirikko muodostuu, kun tierakenteen routaantuessa hienojakoinen maa-aines imee saatavilla olevaa vettä muodostaen tien runkoon jäälinssejä. Sulaessaan jäälinssit kasvattavat tierungon vesipitoisuutta ja heikentävät tierakenteen kuormitusten sietokykyä. Runkokelirikko on sitä hankalampaa, mitä suuremmat liikennekuormitukset ovat. Runkokelirikko aiheuttaa usein pahoja epätasaisuuksia, joka hankaloittavat tai jopa estävät ajoneuvojen liikkumisen. Vaurioiden tehokas korjaaminen on myös kallista. Painorajoituksia käytetään yleisesti vähentämään liikennekuormituksia ja pienentämään runkokelirikon aiheuttamia haittoja kriittisenä sulamisaikana.

Raportissa "Soratiestön runkokelirikko" [Belt ym., 1999] on selvitetty valtakunnallisesti soratiestön runkokelirikon laajuutta ja laatua, runkokelirikon aiheuttamia kustannuksia sekä soveltuvia korjaustoimenpiteitä ja niiden kustannuksia Suomessa. Raportissa on tutkittu myös runkokelirikon syntyyn vaikuttavia tekijöitä ja todettu, että sopivien ilmastomuuttujien avulla on mahdollista ennustaa kevään runkokelirikon vaikeus. Parhaiten runkokelirikon määrän muutoksia selittivät tierakenteen routaantumisaika syksyllä, yöpakkasvuorokausien lukumäärä sulamisaikana sekä routan sulamisaika keväällä. Tutkimuksen yhtenä pääaineistona oli sorateiden runkokelirikon inventointitietokanta vuosilta 1996 - 1998. Tässä tutkimuksessa käytetään samaa tietokantaa, mutta se sisältää myös uudemman aineiston eli käytössä ovat vuosien 1996 - 2002 inventointitiedot.

Perinteisten runkokelirikon kunnostustoimenpiteiden toimivuutta ja pitkäikäisyyttä on epäilty, koska kunnostustoimenpiteitä joudutaan tekemään toistuvasti samoille teille ja osin jo korjattuihin kohtiin. On toivottavaa, että sijoitettaessa resursseja kunnostustoimenpiteisiin tunnettaisiin, kuinka tehokas ja kestävä valittu toimenpide on. Tällöin voidaan tarpeen vaatiessa valita kertakustannuksena ehkä kalliimpi mutta kuitenkin kestävä tapa korjata ja ehkäistä runkokelirikkoa.

Tiehallinto on siirtynyt teiden hoidon alueurakoihin, jotka kilpailutetaan. Hoidon alueurakoitsijalla on kokonaisvastuu hoitamansa alueen tieverkon kesä- ja talvihoidosta. Uuden toimijan mukaantulo ei saa näkyä teiden hoidon laatutasossa. Runkokelirikon esiintyminen on yksi merkittävä vähäliikenteisten teiden laatutasoa huonontava ominaisuus. Hoitourakka-alueen runkokelirikon laajuus ja rankkuus sekä painorajoitusten laajuus tulisi kyetä ennakoimaan, jottei teiden liikennöitävyys tarpeettomasti huonone painorajoitusten tai teiden runkokelirikosta johtuvan huonon kunnon vuoksi. Valtakunnallisella menettelyllä voidaan yhtenäistää painorajoituskäytäntöä ja suunnata kunnostusresursseja sinne, missä tarve on suurin. Runkokelirikon rankkuuden ennakointi helpottaa myös urakoitsijaa, sillä ennusteen avulla voidaan tarvittaessa varata kunnossapitokalustoa ja -materiaalia kevään toimenpiteitä varten.

Minnesotan osavaltiossa on tutkittu jo vuosia runkokelirikkoa ja kehitetty sen perusteella painorajoituskäytäntöä. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan Minnesotan nykyistä painorajoitusjärjestelmää ja sen perusteita sekä etsitään mahdollisia, Suomen olosuhteisiin sovellettavia ratkaisuja. Toisessa vaiheessa täydennetään uudemmilla tie-

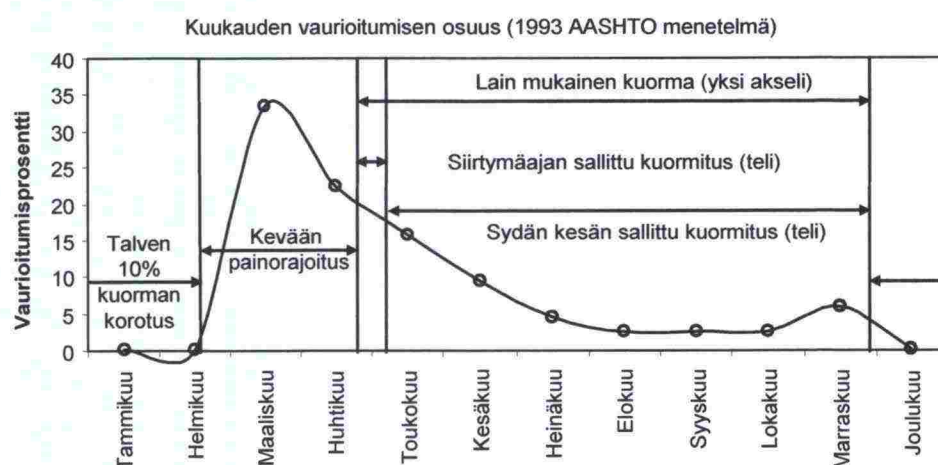
doilla vuoden 1999 raporttia "Soratiestön runkokelirikko" sekä sää- että runkokelirikkoinventointitietojen osalta. Edellä kootun aineiston perusteella luodaan sääteki-
jöihin pohjautuvat mallit runkokelirikon rankkuuden sekä -pituuden ennustamiseksi. Kolmannessa vaiheessa selvitetään runkokelirikon inventointitietokantaa hyväksi-
käyttäen erilaisten kunnostustoimenpiteiden toimivuutta ja pitkäikäisyyttä. Lopuksi
tarkastellaan painorajoitusten asettamista hoitourakoinnin näkökulmasta ja esitetään
menettely, jonka avulla hoitourakka-alueen painorajoitusten määrä voidaan enna-
koida.

2 PAINORAJOITUKSET MINNESOTASSA

2.1 Johdanto

Sellaisilla alueilla Yhdysvalloissa, joissa vuosittain esiintyy routaantumis-sulamis-ilmiö, käytetään keväisin painorajoituksia vähentämään raskaiden ajoneuvojen aiheuttamia rasituksia tierakenteeseen. Painorajoituksia käytetään kaikilla teillä, joita ei ole suunniteltu kestämaan 10 tonnin akselikuormaa keväällä. Painorajoituksen alaisia päällystettyjä teitä on Minnesotan osavaltiossa kaikkiaan noin 62 000 km. Tästä pituudesta noin 2 600 km on osavaltion valtateitä, 38 000 km piirikuntien teitä, 3 900 km kaupunkien ja kuntien teitä ja 17 000 km muita paikallisin varoin rakennettuja ja ylläpidettyjä teitä [Mn/DOT, 2002].

Painorajoitukset vaihtelevat vuodenajoittain tierakenteen rasitustensietokyvyn mukaan (kuva 1, taulukko 1). Talvella sallitaan 10 % tavanomaista suurempi kuormitus, sillä tuolloin riittävän syvälle edennyt routa lisää rakenteen kantavuutta. Keväällä osa sulamisvesistä kertyy rakenteeseen ja heikentää rakennetta, jolloin sallittu kuorma on vuoden pienin. Sulamiskauden jälkeen rakenne palautuu (tiivistyy) ja yhden akselin sallittu kuorma on laissa määritellyn suuruinen talven tuloon saakka. Siirtymäaikana telikuormat saavat olla hiukan normaalia suuremmat ja sydänkesällä vuoden suurimmat.



Kuva 1. Vaurioitumisen ja painorajoitusten jakaantuminen vuoden kuukausille (1993 AASHTO menetelmä) [Embacher, 2002].

Taulukko 1. Esimerkki akseliyhdistelmien maksimipainoista /Embacher, 2002/.

Akselien määrä (akselien etäisyys)	Massa (kg)				
	Lainmukainen kuorma	Talven sallittu 10% ylikuorma	Kevään painorajoitus	Sydän kesän sallittu kuorma	Siirtymä ajan sallittu kuorma
Yksi akseli	9 072	9 979	4 536	9 072	9 072
Kaksi akselia (< 2.4 m)	15 422	16 965	8 568	18 144	16 330
Kolme akselia (< 2.7 m)	19 051	20 956	10 836	27 216	23 134
Neljä akselia (< 4.3 m)	22 680	24 948	13 432	32 659	30 845

Routasulamisen alkuajankohta ja kesto riippuvat useista tekijöistä, kuten tien rakenteesta ja materiaaleista, alusrakenteen laadusta, kuivatuksesta, sateista sekä lämpötiloista. Käytännön rutiineja varten tarvitaan kuitenkin kohtuullisen yksinkertainen mutta riittävän tarkka menettely, jolla painorajoitusaika voidaan määrittää. Sulamiskehityksen alku on useimmissa tapauksissa voitu määrittellä päällysteen ja kantavan kerroksen yläpinnan lämpötilan avulla. Sulaminen alkaa, kun lämpötila lähestyy 0°C . Samalla rakenteen lujuus putoaa nopeasti /Van Deusen ym., 1997/.

Tien rakenteellisen toiminnan vuodenaikaisvaihtelun selvittämiseksi on Minnesotassa tehty testejä kahdeksassa koekohteessa, joissa on ollut joustava päällysrakenne. Päällystepaksuus on vaihdellut 75 ja 150 mm välillä (AB 120/150). Kuuden kohteen alusrakennemateriaali on ollut silttinen savi ja kahden hiekka. Päällysrakennepaksuudet ovat vaihdelleet ~ 120 ja 470 mm välillä. Kuudessa rakenteessa on ollut kantava/jakava kerros ja kahdessa oli ns. täyssyväsfalitti.

Koekohteiden rakenteellisen toiminnan vuodenaikaisvaihtelun selvittämiseksi on Minnesotassa tehty testejä kahdeksassa koekohteessa, joissa on ollut joustava päällysrakenne. Päällystepaksuus on vaihdellut 75 ja 150 mm välillä (AB 120/150). Kuuden kohteen alusrakennemateriaali on ollut silttinen savi ja kahden hiekka. Päällysrakennepaksuudet ovat vaihdelleet ~ 120 ja 470 mm välillä. Kuudessa rakenteessa on ollut kantava/jakava kerros ja kahdessa oli ns. täyssyväsfalitti.

- Maksimitaipuma D1
- SCI (Surface Curvature Index) parametri (D_1 - D_3)
- BDI (Base Damage Index) parametri (D_3 - D_5)
- Taipumasuppilon pinta-ala
- Alusrakenteen jäykkyysmoduuli

Pudotuspainolaitteen taipumaparametrit on mallinnettu päällysteen keskimääräisen lämpötilan perusteella. Lämpötilan vaikutus on eliminoitu mittaamalla pudotuspainolaitteella saman päivän aikana useassa eri lämpötilassa ja mallintamalla taipumaparametrit erikseen kullakin koeläpöteella. Mittauksissa kuormituslevyn halkaisija on ollut 300 mm ja kuormitus 40 kN /Van Deusen ym., 1997/.

Historiatietojen perusteella ilman lämpötilojen vuosikeskiarvo vaihtelee Minnesotassa pohjoisen osan $+3.5^{\circ}\text{C}$ ja eteläisen osan $+7.0^{\circ}\text{C}$ välillä. Pakkasmäärät vaihtelevat vastaavasti $1\ 600^{\circ}\text{Cvrk:n}$ ja 900°Cvrk:n välillä. Kylmimmän talven pakkasmäärä on ollut $2\ 100^{\circ}\text{Cvrk}$.

Päällysteen ja kantavan kerroksen lämpötilojen vuorokausikeskiarvojen on havaittu sulamisaikana vastaavan likimäärin toisiaan. Ilman lämpötilan vuorokausikeskiarvo on sen sijaan ollut sitä alhaisempi, mitä myöhemmin sulaminen on alkanut (tammi-kuussa -0.9°C , helmikuussa -2.3°C ja maaliskuussa -4.3°C). Tämä johtuu auringon paistokulman kasvusta, jolloin tien pinta absorboi auringon lämpöä sitä paremmin, mitä ylempää aurinko säteilee.

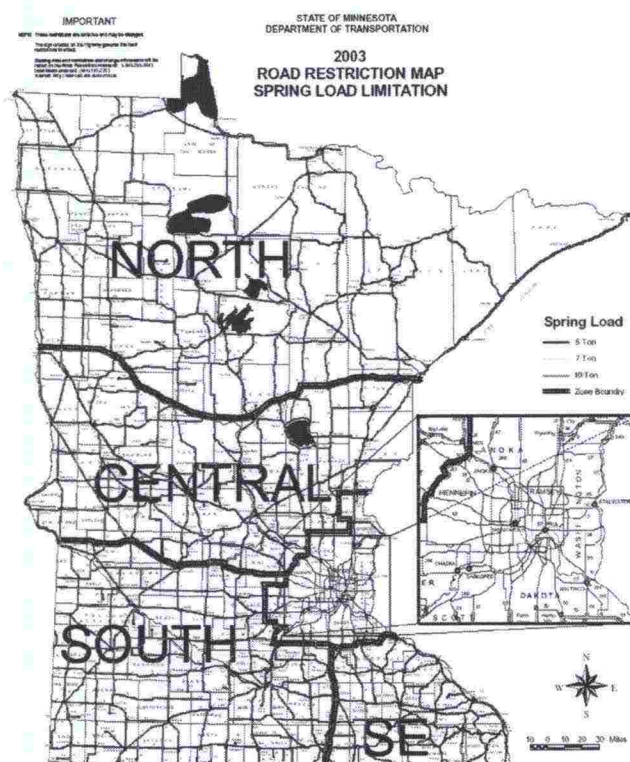
Karkean alusrakenteen (hiekka) päälle tehtyjen kohteiden maksimitaipumissa ei havaittu merkittävää huippua sulamisaikana. Taipumasuppilon pinta-ala kuitenkin kasvoi sulamisaikana ja suurimmat arvot esiintyivät sulamisen lopussa. Hienorakeisille alusrakenteille (silttinen savi) tehdyt koekohteet olivat heikoimmillaan kolmen viikon kuluessa sulamisen päättymisestä tarkan ajan kuitenkin vaihdellessa.

Tutkimuksissa on myös havaittu, että routanousun palautuminen vastaa suurin piirtein tilannetta, jolloin rakenne on täysin sulanut ja maksimitaipuma on suurimmillaan. Routanousun seuraamisen todettiin olevan hyvä vaihtoehto määriteltäessä sulamiskauden pituutta.

2.2 Kevään painorajoitusmenettely

Esitettävä menettely on tällä hetkellä käytössä Minnesotan osavaltiossa ja siinä määritellään painorajoitetut tiet, painorajoitusten suuruus sekä kevään painorajoituksen alku ja loppuajankohta.

Piirit ilmoittavat painorajoitetut tieosat internetin välityksellä painorajoituskarttaa varten. Tiedot painorajoituksista pyritään saamaan painorajoituskevättä edeltävänä vuonna marraskuun 30. päivään mennessä. Painorajoituskartta (ROAD RESTRICTION MAP) on nähtävillä internetosoitteessa <http://mnroad.dot.state.mn.us> painorajoituskevättä edeltävän tammikuun 31. päivään mennessä. Painorajoitusalueita on viisi: pohjoinen, keskinen, eteläinen, kaakkoinen ja suurakaupunki alue (kuva 2) /Stehr, 2003/.



Kuva 2. Kevään 2003 painorajoituskartta Minnesotan osavaltioista.

Painorajoituksen suuruus, joka koskee yksittäisakselia, esitetään kartalla värikoodeilla. Vuonna 2003 painorajoitusluokat olivat 5 (punainen), 7 (keltainen) ja 10 tonnia (vihreä). Piirit voivat myös tarvittaessa tehdä yksittäisiä muutoksia painorajoituksiin ja tieosiin. Kevään painorajoitusten päivämääristä ilmoitetaan ennakkoon internetin ja nauhoitetun tiedotteen välityksellä vähintään kolme vuorokautta aiemmin kuin ne asetetaan (tai poistetaan) /Stehr, 2003/.

Painorajoituksen alkupäivä määrätään erikseen kullekin viidelle alueelle ilman vuorokausikeskiarvolämpötilojen perusteella. Mitattujen lämpötilojen lisäksi mukana on myös kolmen päivän ennuste. Rajoitus asetetaan, kun kumulatiivisen lämpösumman CTI arvo on 14°Cvrk ($=336^{\circ}\text{Ct}$). Kolmen päivän ennusteen avulla varmistutaan siitä, että painorajoitus saadaan asetetuksi varmasti juuri sulamisen alkuvaiheessa. Lisäksi käyttäjät voivat varautua ennakolta tulevaan painorajoitukseen /Stehr, 2003/.

Kumulatiivinen lämpösumma lasketaan kaavalla 1. Vuorokauden lämpösumma kasvattaa kumulatiivista lämpösummaa, mutta mikäli sulamisaikana on pakkasvuorokausi, pienennetään kumulatiivista lämpösummaa puolella pakkasvuorokauden pakkasummasta.

$$\text{CTI} = \sum_{i=1}^n (\text{DTI} - 0.5 * \text{DFI}) \quad (1)$$

missä CTI = Kumulatiivinen lämpösumma ($^{\circ}\text{Cvrk}$)
 DTI = Vuorokauden lämpösumma ($^{\circ}\text{Cvrk}$)
 DFI = Vuorokauden pakkasumma ($^{\circ}\text{Cvrk}$)

Vuorokauden lämpösumma on määritelty tierakenteen sulamista ajatellen siten, että ilman minimi ja maksimilämpötilan keskiarvosta vähennetään auringonpaistokulmasta johtuva vertailulämpötila (kaava 2).

$$\left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_{\text{ref}} \right) > 0^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

missä T_{\max} = Ilman lämpötilan maksimi vuorokauden aikana ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{\min} = Ilman lämpötilan minimi vuorokauden aikana ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ref} = Auringon paistokulmasta johtuva vertailulämpötila ($^{\circ}\text{C}$)

Jos kaavan 2 tulos on suurempi kuin 0°C , lasketaan vuorokauden lämpösumma DTI kaavalla 3 ja vuorokauden pakkasumma DFI on 0°C .

$$\text{DTI} = \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_{\text{ref}} \right) \quad (3)$$

Mikäli kaavan 2 tulos on pienempi kuin 0°C , vuorokauden lämpösumma DTI on 0°C ja vuorokauden pakkasumma DFI lasketaan kaavalla 4

$$\text{DFI} = 0^{\circ}\text{C} - \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \quad (4)$$

Lämpösummien laskennassa tarvittava vertailulämpötila T_{ref} on tammikuun lopussa 0°C ja pienenee toukokuun loppuun mennessä -9.5°C . Lopun ajan vuodesta vertailulämpötila on nolla (taulukko 2).

Taulukko 2. Kumulatiivisen sulamisindeksin laskennassa tarvittava vertailulämpötila T_{ref} /Stehr, 2003/.

Päiväys						T _{ref} (°C)
Tammikuu	1	–	Tammikuu	31		0.0
Helmikuu	1	–	Helmikuu	7		-1.5
Helmikuu	8	–	Helmikuu	14		-2.0
Helmikuu	15	–	Helmikuu	21		-2.5
Helmikuu	22	–	Helmikuu	28		-3.0
Maaliskuu	1	–	Maaliskuu	7		-3.5
Maaliskuu	8	–	Maaliskuu	14		-4.0
Maaliskuu	15	–	Maaliskuu	21		-4.5
Maaliskuu	22	–	Maaliskuu	28		-5.0
Maaliskuu	29	–	Huhtikuu	4		-5.5
Huhtikuu	5	–	Huhtikuu	11		-6.0
Huhtikuu	12	–	Huhtikuu	18		-6.5
Huhtikuu	19	–	Huhtikuu	25		-7.0
Huhtikuu	26	–	Toukokuu	2		-7.5
Toukokuu	3	–	Toukokuu	9		-8.0
Toukokuu	10	–	Toukokuu	16		-8.5
Toukokuu	17	–	Toukokuu	23		-9.0
Toukokuu	24	–	Toukokuu	30		-9.5
Kesäkuu	1	–	Joulukuu	31		0.0

Kevään painorajoituksen poistamisen ajankohta määritetään myös erikseen kullekin ilmastoalueelle. Ajankohdan määrittämiseen käytetään seuraavia muuttujia /Stehr, 2003/:

- Kevään kumulatiivinen lämpösumma
- Kevään kumulatiivinen sademäärä
- Edeltävän syksyn kumulatiivinen sademäärä
- Edeltävän talven pakkasmäärä

Kumulatiivinen sadanta lasketaan syksyn ja kevään sademäärien summana. Sadantatieto on kerätty Mn/Road -sääasemilta. Syksyn kumulatiivisessa sademäärässä on mukana aikaväli 30 vuorokautta ennen pakkaskauden alkua - rakenteen routaantumisaika. Kevään kumulatiivista sademäärää aletaan laskea hetkestä, jolloin sulamiskausi alkaa /Embacher, 2002/.

Lämpötilakorjatuista taipumaparametreista, kumulatiivisesta kevään lämpösummasta sekä kumulatiivisesta syksyn ja kevään sadannasta tehdään regressioanalyysi. Tulos piirretään kolmeulotteiseksi kuvaajaksi, päätetään sopiva rakenteen palautumista vastaava taipumaparametrin taso ja irrotetaan taso kaksiulotteiseksi kuvaajaksi. Saadun kuvaajan akselit ovat kevään kumulatiivinen lämpösumma ja kumulatiivinen sademäärä. Sijoittamalla kaksiulotteiseen kuvaajaan kumulatiivinen lämpö- ja sadesumma voidaan päätellä, milloin kevään painorajoitus voidaan poistaa /Embacher, 2002/.

Minimi painorajoitusaika on asetettu 4 viikon pituiseksi eli painorajoitus poistetaan aikaisintaan 4 viikon kuluttua sen asettamisesta. Pisin painorajoitusaika on yleensä lyhyempi kuin 8 viikkoa. Ainoastaan poikkeukselliset sääolosuhteet tai tien poikkeuksellinen sulamiskäyttäytyminen saattaisivat vaatia yli 8 viikkoa kestävä painorajoitusaikaa /Stehr, 2003/.

Minnesota-tutkimuksissa sorateiden rakenteen sulamiskäyttäytymisen määrittämiseen on käytetty tunkeumalaitetta (Dynamic Cone Penetrometer) riittämättömän pudotuspainolaitteiden lukumäärän vuoksi. Mittauksesta saatava tunkeumasyyvyys iskua kohden on ollut suurimmillaan sulamisen alussa. Kesäajan tunkeumasyyvyys on määritetty 20 viikon kuluttua sulamisesta. /Embacher, 2002/.

Sorateiden painorajoituksen alkamisajankohta on sama ja määräytyy samoin perustein kuin päällystetyillä teillä. Tien palautuminen routasulamisen jälkeen kesäkantaavuuteen on ollut havaittavissa, mutta tarkka aika ei ole satunnaisten vaihtelun takia ollut määritettävissä. Asiaa on tarkasteltu tilastollisesti ja todettu, että painorajoitus voidaan poistaa 8 viikon kuluttua sulamisen alkamisesta /Embacher, 2002/.

Minnesota sijaitsee etelämpänä (45° .. 48° N) Suomeen verrattuna (60° .. 70° N), minkä vuoksi auringon vaakasuoraa pintaa lämmittävä vaikutus on suurempi kuin Suomessa. Tämän takia aurinkoisena päivänä tienpintalämpötilan ja ilman lämpötilan ero on Minnesotassa suurempi kuin Suomessa /Saarelainen, 2003/.

3 Runkokelirikon esiintyminen

3.1 Tausta

Runkokelirikon esiintymistä ja siihen vaikuttavia ilmastotekijöitä tarkastellaan raportissa "Soratiestön runkokelirikko" (Tielaitoksen tutkimuksia 1/1999, TIEL 3100021) esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Kyseisessä raportissa on tutkittu runkokelirikon inventointitietokannan ja viiden osa-alueen ilmastotietojen perusteella runkokelirikon syntyyn vaikuttavia tekijöitä ja todettu, että ilmastomuuttujien avulla on mahdollista ennustaa kevään runkokelirikon vaikeus. Runkokelirikon määrän muutoksia selittivät muun muassa tierakenteen routaantumisaika syksyllä, yöpakkasvuorokausien lukumäärä sulamisaikana sekä roudan sulamisaika keväällä.

Aiemman raportin aineisto oli vuosilta 1996 - 1998. Tämän raportin aineisto on seitsemältä vuodelta (1996 - 2002), mikä parantaa ennusteen tarkkuutta ja mahdollistaa useamman muuttujan käytön malleissa.

3.2 Lähtöaineistot

3.21 Runkokelirikkotietokanta

Runkokelirikkotietokannassa on mukana koko sorateiden hallintajärjestelmän data-aineisto, myös tierekisteri sorateiden osalta. Tätä tierekisteriä, joka vastaa tilannetta 1.1.2002, on käytetty aineiston käsittelyssä.

Alkuperäinen runkokelirikkotietokannan "tierekisteri" -taulukko sisältää 238 131 tietuetta, "SRH_Kelirikot" -taulukko 70 660, "SRH_painorajoitukset" -taulukko 853, "SRH_Soratiet" -taulukko 70 830 ja "SRH_Toimenpiteet" -taulukko 4 040 tietuetta.

Runkokelirikkotaulukosta "SRH_Kelirikot" on poistettu tietueet, joissa

- tienumerot ovat "kokeilujen tulosta", esimerkiksi tienumero 99999 (3 kpl)
- kelirikkopituus on 0 tai negatiivinen (noin 200 kpl)
- on epälooginen päiväys, kuten vuosi 599 (1 kpl)
- kaksi kertaa tai useammin esiintyvät samat tietueet (27 kpl), jotka olivat aiemmin Kaakkois-Suomen tiepiiriin ja nyttemmin Hämeen tiepiiriin kuuluvia runkokelirikkokohteita

Runkokelirikkotaulukossa oli 1 868 tietuetta sellaisilla teillä ja tieosilla, joita ei ole tierekisteritaulukossa. Syynä voi olla se, että vuosien saatossa sorateita on päällystetty. "Keskinen" ja "itäinen" otosalue määritetään kunta- ja maakuntatietojen avulla. Kunta- ja maakuntatiedot sisältäviä kelirikkoinventointitietueita on 68 475 kappaletta. Kaikkiaan inventointitietueita on 70 343 kappaletta, mutta osa niistä voidaan kohdentaa ainoastaan tieosoitteen tai tiepiirin perusteella.

Soratiepituus muuttuu hiukan vuosittain. Vuosien keskinäinen vertailu kuitenkin edellyttää, että tarkastellaan joka vuosi samaa soratieosuutta. Lähtökohdaksi on otettu se, että soratiet ja niiden pituus määritetään tilanteen 1.1.2002 mukaan. Tierekisterissä on erikseen sorateita koskevat historiatiedot vuosilta 1996 - 2003 (taulukko 3).

Taulukko 3. Tierekisteristä tilatut sorateita koskevat kentät ja historiatiedot.

Kentän nimi	Kentän kuvaus	Historiatiedot 1996-2003
PIIRI	Piirin koodi	
TIE	Tiennumero	
AJR	Ajoradan numero	
AOSA	Alkuosa	
AET	Alkuetäisyys (m)	
LOSA	Loppuosa	
LET	Loppuetäisyys (m)	
PITUUS	Tieosuuden pituus (m)	
TIETY	Tien pätkän tyyppi	
KUNTA	Kuntakoodi	
MAAKUNTA	Maakunnan koodi	
TMP	Tiemestaripiiri	
TOIML	Nykyinen tieluokka	
133VV	Teknisen toimenpiteen vuosi	Kyllä
TP	Tekninen toimenpide	Kyllä
134VV	Hallinnollisen toimenpiteen vuosi	Kyllä
HTP	Toimenpiteen luonne	Kyllä
ALEV	Ajoradan leveys (dm)	Kyllä
137VV	Päällystämivuosi	Kyllä
PAAL	Päällysteen laji	Kyllä
KRAJT	Kelirikkorajoituksen suuruus (t)	Kyllä
KRAJV	Kelirikkorajoituksen vuosi	Kyllä
PAALLEV	Päällysteen leveys (dm)	Kyllä
KVL	Vuoden KVL (ajon./vrk)	
KKVL	Kesän KVL (ajon./vrk)	
RASKOS	Raskaiden ajoneuvojen osuus yhteensä %	
LASKVV	Laskentavuosi	
210VV	Kantavuuskeskiarvon mittausvuosi	Kyllä
LAITE210	Kantavuuskeskiarvon mittauslaite	Kyllä
K2	Routivuuskerroin	Kyllä
KEVATKANT	Kevätkantavuus (MN/m2)	Kyllä
306VV	Teknisen tutkimuspisteen rakentamivuosi	
TEKPUOLI	Teknisen tutkimuspisteen puoli (1=oikea,2=vasen)	
TEKTYYP	Tutkimuspisteen tyyppi	
TEKNRO	Tutkimuspisteen piirikohtainen numerointi	
NIMI306	Tutkimuspisteen nimi tms.	
KRUHKA	Alttius kelirikolle (1=A,2=B,3=C,4=D)	Kyllä
SUORITE	Vuosisuorite (1000 akm)	
TIELEV	Tien leveys (dm)	

3.22 Sää tiedot

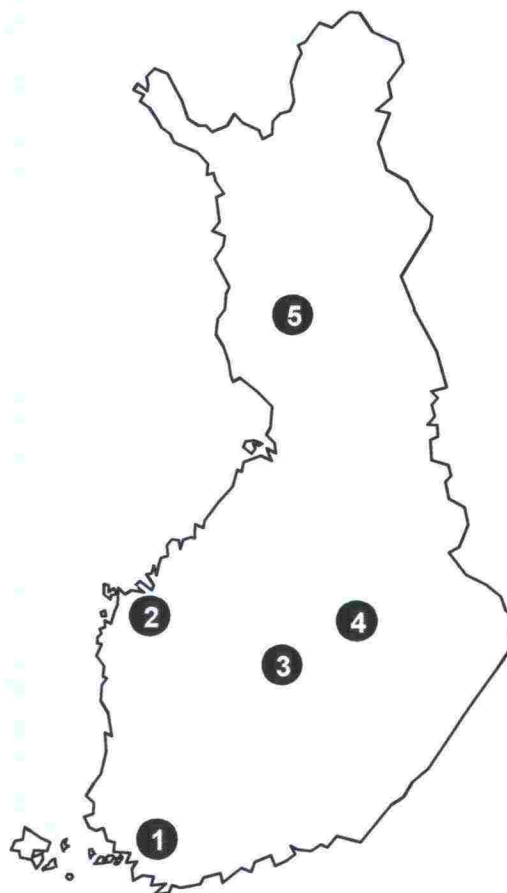
Sään vaikutusta runkokelirikon esiintymiseen selvitetään viidellä otosalueella. Aikajakson 1995 .. 2002 sisältävät sää tiedot on saatu Ilmatieteen laitokselta ja ne sisältävät seuraavat arvot: Ilman lämpötilan vuorokausikeskiarvo, -minimi ja -maksimi sekä vuorokauden sademäärä. Tiedot ovat täydelliset ja ilmeisen virheettömät.

Sääasemat on valittu aiemman tutkimuksen mukaisesti mutta kuitenkin niin, että ne edustaisivat mahdollisimman hyvin viiden otosalueen ilmastoa (taulukko 4, kuva 3).

Taulukko 4. Otosalueiden säähavaintoasemat.

Alue	WMO	LPNN	Aseman nimi	Lev	Pit	Kork	Aloituspäivä
1	02973	0211	Suomusjärvi Taipale	6019	2342	0069	01.02.1988
2	05362	3101	Ylistaro Pelma	6256	2229	0026	18.12.1927
3	02935	2401	Jyväskylä Lentoasema/Jyväskylä	6224	2540	0139	01.01.1945
4	02917	3601	Kuopio Lentoasema/Siilinjärvi	6301	2748	0094	01.05.1945
5	05136	7502	Rovaniemen Mik Apukka	6634	2600	0106	01.01.1939

WMO Kansainvälinen tunnusnumero
LPNN Kansallinen tunnusnumero
Lev Aseman sijainti asteina ja minuutteina pohjoista leveyttä
Pit Aseman sijainti asteina ja minuutteina itäistä pituutta
Kork Aseman korkeus merenpinnasta metreinä

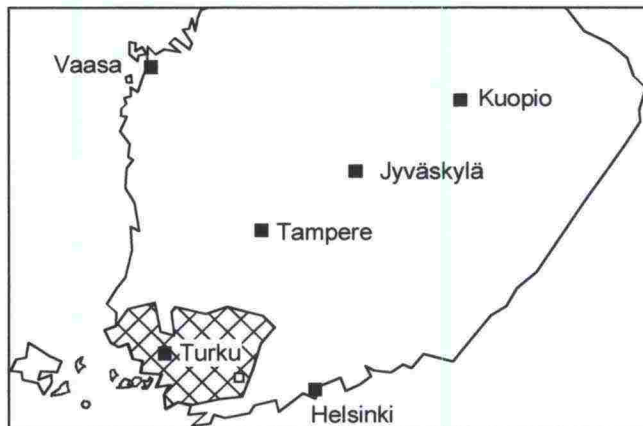


Kuva 3. Tutkimuksessa käytettävät Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemat.

3.23 Otosalueiden teiden valinta

3.231 Alue 1, eteläinen

Tutkimuksessa "Soratiestön runkokelirikko" /Belt ym., 1999/ eteläisen otosalueen tiepituus oli 1055 km. Vuoden 2002 tierekisterin mukaan samojen teiden kokonaispituus oli 1032 km. Eteläistä ilmastoaluetta muokattiin jonkin verran (kuva 4). Aluksi valittiin sääaluetta edustavat kunnat ja näissä kunnissa olevien sorateiden numerot. Valitut soratiet otettiin mukaan koko pituudeltaan, vaikka ne jatkuvatkin ohi valitun alueen kuntarajoista. Eteläisen otosalueen soratiepituudeksi saatiin 1 287 km.

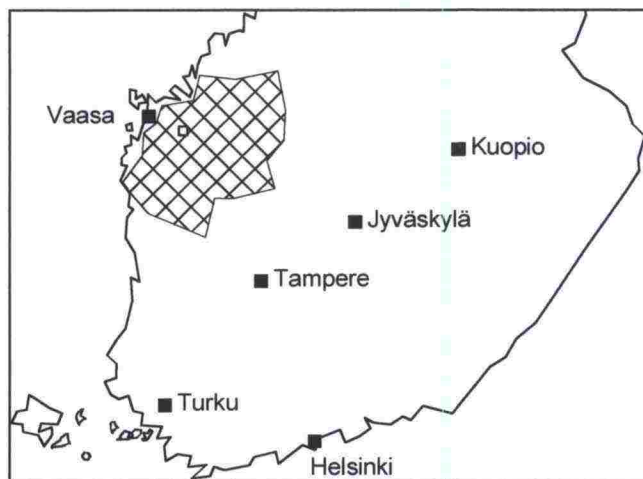


Kuva 4. "Eteläinen" otosalue.

3.232 Alue 2, läntinen

Läntisen otosalueen tiepituus oli 887 km /Belt ym., 1999/. Vuoden 2002 tierekisterin mukaan samojen teiden kokonaispituus oli 871 km eli soratiepituus oli lyhentynyt noin 16 km.

Läntinen otosalue on valittu samalla periaatteella eteläinen otosalue. Otosalue on muutoin entisenkaltainen, mutta siihen on lisätty ydinalueen kunnat Kauhava, Lapua, Nurmo, Seinäjoki, Ilmajoki, Kurikka ja Kauhajoki. Otosalueen soratiepituus on 1 248 km (kuva 5).

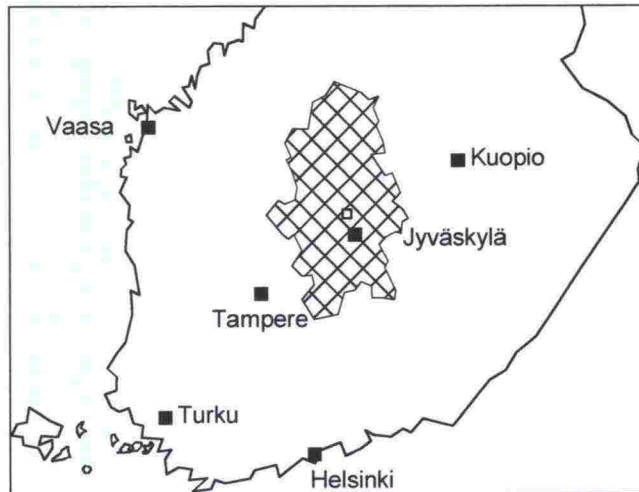


Kuva 5. "Läntinen" otosalue.

3.233 Alue 3, keskinen

"Keskisen" otosalueen tiepituus oli aiemmin 2 401 km. Vuoden 2002 tierekisterin mukaan samojen teiden kokonaispituus oli 2 369 km. Tarkempi tarkastelu osoitti, että vuoden 1998 jälkeen on otettu käyttöön uusia tienumeroita. Nämä soratiet mukaan lukien keskisen otosalueen sorateiden yhteispituus oli 2 408 km. Tähän otosalueeseen

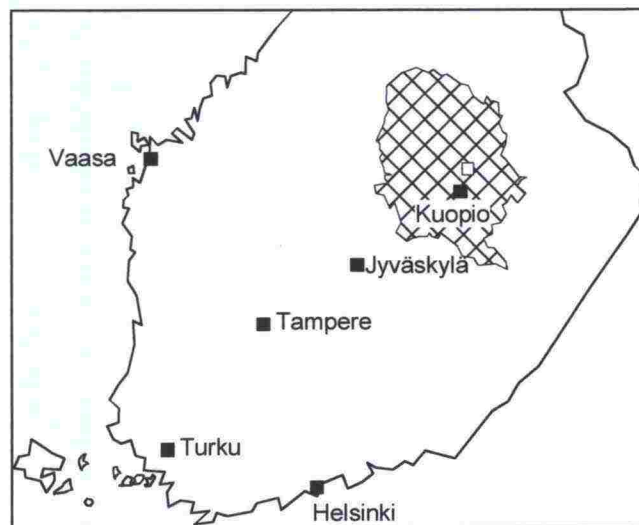
seen kuuluvat kaikki ne soratiet ja niiden tieosat, jotka rajoittuvat keskisuomen tiepiiriin (kuva 6).



Kuva 6. "Keskinen" otosalue.

3.234 Alue 4, itäinen

"Itäisen" otosalueen tiepituus oli 2815 km. Vuoden 2002 tierekisterin mukaan samojen teiden, jotka rajoittuvat Savon maakuntaan, kokonaispituus oli 2 789 km. Itäiseltä otosalueelta puuttui aiemmin yhden kunnan (Kangaslampi) tiet, jotka lisättiin otosalueeseen. Samoin lisättiin puuttuvia sorateita Iisalmen, Kiuruveden, Leppävirran, Pielaveden, Vehmersalmen ja Vesannon kunnista yhteensä noin 69 km. Uudistetun otosalueen soratiepituus on 2 859 km (kuva 7).

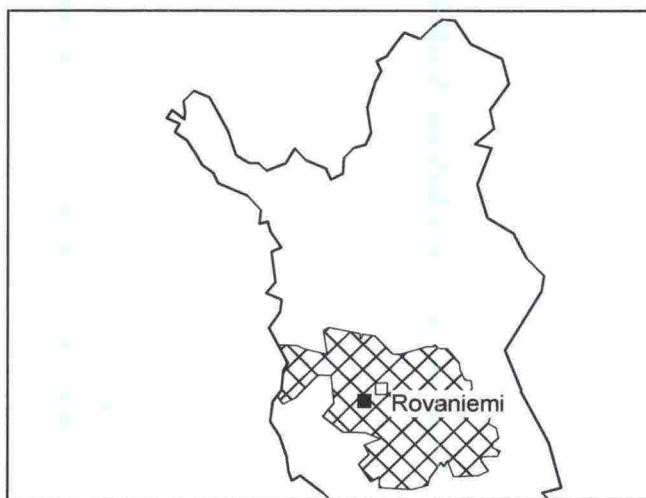


Kuva 7. "Itäinen" otosalue.

3.235 Alue 5, pohjoinen

Teitä "pohjoisen" otosalueeseen oli aiemmin valittu Kemijärven, Pellon, Posion, Ranuan ja Rovaniemen maalaiskunnista ja otosalueen soratiepituus oli 825 km.

Vuoden 2002 tierekisterin mukaan samojen teiden kokonaispituus oli 819 km. Valittaessa mukaan kaikki 137 eo. kuntien soratietä saadaan otosalueen soratiepituudeksi 1 257 km (kuva 8).



Kuva 8. "Pohjoinen" otosalue.

3.3 Aineiston käsittely

Runkokelirikkotietokannassa olevan tierekisteritaulukon mukaan soratiestön kokonaispituus 1.1.2002 oli 27 757 km (taulukko 5), joka poikkeaa hiukan aiemman tutkimuksen kokonaispituudesta 27 834 km. Soratiepituus on tässä aineistossa Uudenmaan, Keski-Suomen ja Lapin tiepiireissä hiukan pitempi ja muissa piireissä lyhyempi kuin aiemmin. Eroilla ei ole tämän tutkimuksen kannalta merkitystä, koska runkokelirikkopituutta verrataan tiepiireittäin ja otosalueittain aina saman aineiston kokonaispituuteen. Tässä työssä on käytetty sorateiden vertailupituuksina runkokelirikkotietokannan soratierekisteritaulukosta saatuja soratiepituuksia.

Taulukko 5. Soratiepituudet runkokelirikkotietokannassa olevan tierekisterin mukaan piireittäin vuonna 2002.

	Uusimaa	Turku	Kaak-kols-Suomi	Häme	Savo-Karjala	Keski-Suomi	Vaasa	Oulu	Lappi	Koko maa
Pituus (km)	805	2 155	3 641	2 972	5 215	2 408	2 951	4 563	3 046	27 757
Lukumäärä (kpl)	165	370	490	428	616	270	447	519	269	3 574
Alakvartiili (m)	2 940	3 327	3 638	4 031	4 743	4 630	3 561	3 945	4 180	3 888
Mediaani (m)	4 442	5 255	6 373	6 154	7 679	7 832	5 731	7 263	7 767	6 488
Yläkvartiili (m)	6 529	7 744	10 095	8 926	10 809	12 258	8 647	12 056	13 981	9 985
Keskiarvo (m)	4 878	5 825	7 430	6 944	8 466	8 920	6 601	8 793	11 324	7 766

Otosalueiden soratiepituuksia tarvitaan suhteellisten vauriopituuksien määrittämistä varten (taulukko 6). Otosalueen soratiepituus tulisi olla mahdollisimman pitkä, jotta satunnainen vaihtelu vaikuttaisi mahdollisimman vähän. Toisaalta otosalueen säätiedot pätevät vain kohtalaisen pienellä alueella, etenkin rannikon läheisyydessä. Otosalueiden soratiepituuksien muutoksia on selvitetty kohdassa 2.1.3.

Taulukko 6. Otosalueiden soratiepituudet tierekisterin mukaan vuonna 2002.

Otosalue	Pituus 1999 tutkimuksessa (km)	Pituus tässä tutkimuksessa (km)
1 Eteläinen	1 055	1 287
2 Läntinen	887	1 248
3 Keskinen	2 401	2 408
4 Itäinen	2 815	2 859
5 Pohjoinen	825	1 257

Runkokelirikon pituus koko maassa vaihteli kahdeksan vuoden aikana 465 km:stä (vuosi 2002) 1538 km:iin (vuosi 1998) eli pahimpana vuotena runkokelirikkopituus oli 3.3 kertainen verrattuna helpoimpaan vuoteen. Kelirikkoinventointi oli vuonna 1995 asiantuntijan mukaan "totuttautumista" inventointiin, joten sen vuoden tuloksia ei verrata muihin vuosiin eikä käytetä mallinnuksessa (taulukko 7).

Taulukko 7. Runkokelirikkopituudet (m) tiepiireittäin ja vaurioluokittain.

No	Piiri	VL	Kelirikkopituus (m)							
			1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
1	Uusimaa	1				530	311			
		2				4 678	2 282	18 312	2 022	
		3				13 869	19 679	27 514	3 634	
		Yhteensä				19 077	22 272	45 826	5 656	
2	Turku	1				3 463	20		5 277	
		2	950	2 080	310	20 101	6 616	4 508	27 790	65
		3	28 765	37 065	50 546	48 144	53 199	38 747	22 400	16 733
		Yhteensä	29 715	39 145	50 856	71 708	59 835	43 255	55 467	16 798
3	Kaakkois-Suomi	1		1 409	1 698	1 847	1 275	510	34 609	350
		2		29 680	18 391	54 261	61 506	36 374	55 779	25 518
		3		64 745	174 658	26 147	28 020	20 045	14 557	20 601
		Yhteensä		95 834	194 747	82 255	90 801	56 929	104 945	46 469
4	Häme	1		579		3 990	220	478	351	
		2		1 335	2 700	93 668	12 995	81 856	57 415	865
		3		44 188	53 568	285 814	135 769	191 813	102 449	37 841
		Yhteensä		46 102	56 268	383 472	148 984	274 147	160 215	38 706
8	Savo-Karjala	1		720	875	2 894	1 087	9 666	1 184	566
		2		60 730	53 519	61 416	95 231	57 582	70 059	27 789
		3		176 171	114 606	175 331	116 989	135 955	233 730	105 829
		Yhteensä		237 621	169 000	239 641	213 307	203 203	304 973	134 184
9	Keski-Suomi	1	1 170	310	60	1 995		1 990	1 970	740
		2	140 054	1 274	1 145	41 400	15 525	32 010	53 427	6 830
		3	358 937	74 881	126 504	146 139	146 746	117 699	93 735	64 890
		Yhteensä	500 161	76 465	127 709	189 534	162 271	151 699	149 132	72 460
10	Vaasa	1	14 900	8 866	11 815	66 403	77	1 398	618	367
		2	85 500	39 239	184 004	124 064	10 270	15 844	32 202	8 489
		3	112 874	29 431	53 516	116 827	123 103	108 845	116 139	75 979
		Yhteensä	213 274	77 536	249 335	307 294	133 450	126 087	148 959	84 835
12	Oulu	1			49	204	134	144	468	
		2		2 428	3 660	14 084	1 214	2 096	2 712	544
		3		105 042	46 453	190 553	33 350	40 397	40 542	30 160
		Yhteensä		107 470	50 162	204 841	34 698	42 637	43 722	30 704
14	Lappi	1	8 845	150	2 296	224	68	360	123	59
		2	26 030	15 062	23 183	4 236	329	2 953	1 696	525
		3	71 716	40 546	74 068	36 135	27 982	17 119	35 953	40 140
		Yhteensä	106 591	55 758	99 547	40 595	28 379	20 432	37 772	40 724
	Koko maa	1	24 915	12 034	16 793	81 550	3 192	14 546	44 600	2 082
		2	252 534	151 828	286 912	417 908	205 968	251 535	303 102	70 625
		3	572 292	572 069	693 919	1 038 959	684 837	698 134	663 139	392 173
		Yhteensä	849 741	735 931	997 624	1 538 417	893 997	964 215	1 010 841	464 880

Keskimäärin rankin runkokelirikko Suomessa oli vuonna 1998. Piireittäin rankin vuosi kuitenkin vaihteli. Vaikein runkokelirikko Uudenmaan tiepiirissä oli vuonna 2000 (46 km), Kaakkois-Suomen tiepiirissä vuonna 1997 (195 km), Savo-Karjalan

tiepiirissä vuonna 2001 (305 km) ja Lapin tiepiirissä vuonna 1997 (100 km). Keli-
rikkopituus on pääsääntäisesti suurin vaurioluokassa 3, joka on lievin runkokelirikon
aste.

Otosalueiden rankin runkokelirikkovuosi oli 1998 (taulukko 8). Tästä poikkeaa Itäi-
nen otosalue, jolla rankin vuosi oli 2001. Vauriopituus vaihtelee 0.7 % ja 7.9 % vä-
lillä otosalueen pituudesta. Suhteellisesti eniten kelirikkoa esiintyi keskisellä otos-
alueella ja vähiten pohjoisella ja eteläisellä otosalueella.

Taulukko 8. Kelirikkopituudet vaurioluokittain otosalueilla vuosina 1996-2002.

Vaurio- luokka	1996		1997		1998		1999		2000		2001		2002	
	Pituus (km)	Osuus (%)	Pituus (km)	Osuus (%)	Pituus (km)	Osuus (%)	Pituus (km)	Osuus (%)	Pituus (km)	Osuus (%)	Pituus (km)	Osuus (%)	Pituus (km)	Osuus (%)
Alue 1, Eteläinen														
1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.1	0.0	0.0
2	0.6	0.0	0.2	0.0	10.6	0.8	1.1	0.1	0.4	0.0	1.7	0.1	0.1	0.0
3	11.1	0.9	24.9	1.9	37.0	2.9	44.8	3.5	12.3	1.0	12.2	0.9	8.4	0.6
Yhteensä	12.0	0.9	25.1	1.9	48.1	3.7	45.9	3.6	12.7	1.0	14.8	1.1	8.4	0.7
Alue 2, Läntinen														
1	3.4	0.3	0.0	0.0	22.9	1.8	0.1	0.0	0.3	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0
2	2.8	0.2	52.7	4.2	46.5	3.7	6.7	0.5	7.9	0.6	11.6	0.9	5.7	0.5
3	8.1	0.7	20.4	1.6	28.8	2.3	54.9	4.4	57.4	4.6	59.1	4.7	42.8	3.4
Yhteensä	14.4	1.2	73.0	5.9	98.2	7.9	61.7	4.9	65.5	5.2	71.1	5.7	48.7	3.9
Alue 3, Keskinen														
1	0.3	0.0	0.1	0.0	2.0	0.1	0.0	0.0	2.0	0.1	2.0	0.1	0.7	0.0
2	1.3	0.1	1.1	0.0	41.4	1.7	15.5	0.6	31.4	1.3	53.4	2.2	6.8	0.3
3	74.7	3.1	126.5	5.3	146.1	6.1	146.7	6.1	117.2	4.9	93.5	3.9	64.9	2.7
Yhteensä	76.3	3.2	127.7	5.3	189.5	7.9	162.3	6.7	150.6	6.3	148.9	6.2	72.5	3.0
Alue 4, Itäinen														
1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.5	0.0	0.7	0.0	9.0	0.3	0.4	0.0	0.3	0.0
2	2.1	0.1	6.4	0.2	45.8	1.6	66.7	2.3	42.0	1.5	30.3	1.1	18.0	0.6
3	51.2	1.8	35.0	1.2	107.8	3.8	81.6	2.9	79.7	2.8	134.7	4.7	45.0	1.6
Yhteensä	53.4	1.9	41.7	1.5	154.1	5.4	149.0	5.2	130.6	4.6	165.4	5.8	63.3	2.2
Alue 5, Pohjoinen														
1	0.0	0.0	2.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
2	5.5	0.4	6.7	0.5	3.1	0.2	0.3	0.0	1.8	0.1	1.1	0.1	0.1	0.0
3	16.4	1.3	3.0	0.2	25.1	2.0	18.6	1.5	10.7	0.8	23.6	1.9	24.7	2.0
Yhteensä	21.9	1.7	11.9	0.9	28.2	2.2	18.9	1.5	12.7	1.0	24.8	2.0	24.7	2.0

Suomen sorasteistä kärsi keskimäärin 39 % runkokelirikosta vuosina 1996 - 2002. Runkokelirikkoisten sorasteiden lukumäärä vaihteli hieman alle 1 000:sta noin 1 700:aan (taulukko 9). Runkokelirikkoiteita oli suhteellisesti eniten Hämeen (54% sorasteistä) ja Keski-Suomen tiepiireissä (61%) ja vähiten Turun (26%), Kaakkois-Suomen (23%) ja Lapin tiepiireissä (32%).

Taulukko 9. Runkokelirikkovaurioisten sorateiden lukumäärät tiepiireittäin.

No	Piiri	Runkokelirikkoteiden lukumäärä (kpl)								Kaikkien sorateiden	
		1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Med	Lukumäärä (kpl)	Keskipituus (km)
1	Uusimaa			68	55	92	15		62	165	4.442
2	Turku	96	80	120	108	99	67	71	96	370	5.255
3	Kaakkois-Suomi	178	237	122	92	72	112	61	112	490	6.373
4	Häme	134	115	310	232	317	325	233	233	428	6.154
8	Savo-Karjala	212	248	308	229	273	347	203	248	616	7.679
9	Keski-Suomi	149	174	188	176	156	166	142	166	270	7.832
10	Vaasa	60	83	136	253	321	287	203	203	447	5.731
12	Oulu	84	125	230	154	256	226	211	211	519	7.263
14	Lappi	57	42	85	86	97	125	134	86	269	7.767
	Koko maa	970	1104	1567	1385	1683	1670	1258	1385	3574	6.488

Yhdellä tiellä saattoi esiintyä kaikkia kolmea vaurioluokkaa, minkä takia taulukoiden 9 ja 10 lukumäärät eivät täsmälleen vastaa toisiaan. Keskimäärin yhdellä prosentilla sorateista esiintyi luokan 1 runkokelirikkovaurioita, 13 %:lla luokan 2 ja 35 %:lla luokan 3 runkokelirikkovaurioita (taulukko 10). Turun piirissä 1 luokan vaurioita oli keskimäärin 5 %:lla sorateista silloin, kun oli niitä kirjattu. Vaasan, Savon-Karjalan sekä Kaakkois-Suomen piireissä esiintyi pahimpia runkokelirikkovaurioita tavanomaista useammalla soratiellä.

Taulukko 10. Runkokelirikkovaurioisten sorateiden lukumäärät eri vaurioluokissa tiepiireittäin.

No	Piiri	VL	Runkokelirikkoteiden lukumäärä (kpl)								Kaikkien sorateiden lukumäärä
			1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Med	
1	Uusimaa	1			5	1				3	165
		2			30	16	29	6		23	
		3			47	53	80	14		50	
2	Turku	1			17	1		20		17	370
		2	10	1	52	48	33	41	2	33	
		3	96	80	116	94	97	44	71	94	
3	Kaakkois-Suomi	1	10	4	9	7	4	42	2	7	490
		2	76	70	85	77	63	77	50	76	
		3	151	213	80	49	32	32	25	49	
4	Häme	1	3		23	1	3	4		3	428
		2	11	21	191	66	118	172	26	66	
		3	131	102	302	229	293	296	233	233	
8	Savo-Karjala	1	3	5	8	7	15	7	2	7	616
		2	53	87	149	132	113	121	43	113	
		3	186	222	275	154	186	313	178	186	
9	Keski-Suomi	1	1	2	14		3	6	3	3	270
		2	13	8	84	50	70	76	33	50	
		3	149	174	179	173	152	163	142	163	
10	Vaasa	1	10	15	46	3	10	18	8	10	447
		2	33	69	95	51	101	155	68	69	
		3	33	39	101	248	316	284	201	201	
12	Oulu	1		1	4	2	1	8		2	519
		2	4	20	71	16	37	41	17	20	
		3	83	125	228	152	254	226	210	210	
14	Lappi	1	1	3	3	2	3	4	3	3	269
		2	23	15	19	6	19	27	10	19	
		3	48	35	85	86	95	125	134	86	
	Koko maa	1	28	30	129	24	39	109	18	30	3574
		2	223	291	776	462	583	716	249	462	
		3	877	990	1413	1238	1505	1497	1194	1238	

Kaakkois-Suomen tiepiirissä esiintyi 2 luokan vaurioita keskimäärin 16 %:lla ja 3 luokan vaurioita ainoastaan 10 %:lla sorateista. Yleensä helpompaa runkokelirikkoa esiintyy enemmän kuin vaikeampaa runkokelirikkoa.

Kaikkien otosalueiden ilman lämpötilan vuosikeskiarvo oli pienin vuosina 1996 ja 1998 (2.6 °C). Lämpimin vuosi oli 2000, jolloin keskiarvo oli 4.7 °C. Eteläisen, läntisen ja keskisen otosalueen kylmin vuosi oli 1996 sekä itäisen ja pohjoisen kylmin vuosi oli 1998. Keskilämpötilat olivat yleensä hiukan 0 °C yläpuolella, mutta Rovaniemen maalaiskunnan Apukan koeasemalla tehtyjen mittausten mukaan vuoden 1998 keskilämpötila oli -0.8 °C (taulukko 11).

Taulukko 11. Ilman minimi-, keskiarvo ja maksimilämpötilat otosalueilla vuosina 1995-2002.

NO	Alue		Ilman lämpötila (°C)								Kaikki vuodet
			1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	
1	Eteläinen	Minimi	-30.0	-28.6	-24.3	-25.8	-29.5	-22.8	-28.1	-26.5	-30.0
		Keskiarvo	5.3	4.1	5.4	4.6	5.6	6.4	5.2	5.2	5.2
		Maksimi	29.6	26.2	29.6	25.3	30.7	27.0	29.8	28.1	30.7
2	Läntinen	Minimi	-28.7	-31.4	-29.0	-24.2	-40.5	-20.4	-31.7	-31.5	-40.5
		Keskiarvo	4.3	3.1	4.3	3.5	4.1	5.4	3.7	4.3	4.1
		Maksimi	29.2	26.8	30.9	29.7	30.0	30.1	29.4	29.8	30.9
3	Keskinen	Minimi	-33.3	-33.5	-27.2	-34.7	-34.7	-26.6	-33.4	-31.0	-34.7
		Keskiarvo	3.7	2.6	3.4	2.7	3.7	4.8	3.2	3.5	3.4
		Maksimi	29.8	26.7	29.2	29.1	30.4	29.2	29.4	27.7	30.4
4	Itäinen	Minimi	-30.7	-31.8	-27.4	-32.4	-33.7	-25.5	-30.2	-32.0	-33.7
		Keskiarvo	4.1	3.0	3.4	2.7	3.8	5.0	3.5	3.7	3.6
		Maksimi	28.9	26.7	29.7	29.8	30.6	30.5	29.1	27.9	30.6
5	Pohjoinen	Minimi	-39.3	-34.9	-38.9	-42.6	-47.5	-34.7	-37.5	-38.2	-47.5
		Keskiarvo	0.5	0.4	0.5	-0.8	0.5	2.0	0.4	0.2	0.5
		Maksimi	27.2	25.0	29.9	25.7	28.8	29.2	27.6	26.5	29.9
Kaikkien otosalueiden minimi			-39.3	-34.9	-38.9	-42.6	-47.5	-34.7	-37.5	-38.2	-47.5
Kaikkien otosalueiden keskiarvo			3.6	2.6	3.4	2.6	3.6	4.7	3.2	3.4	3.4
Kaikkien otosalueiden maksimi			29.8	26.8	30.9	29.8	30.7	30.5	29.8	29.8	30.9

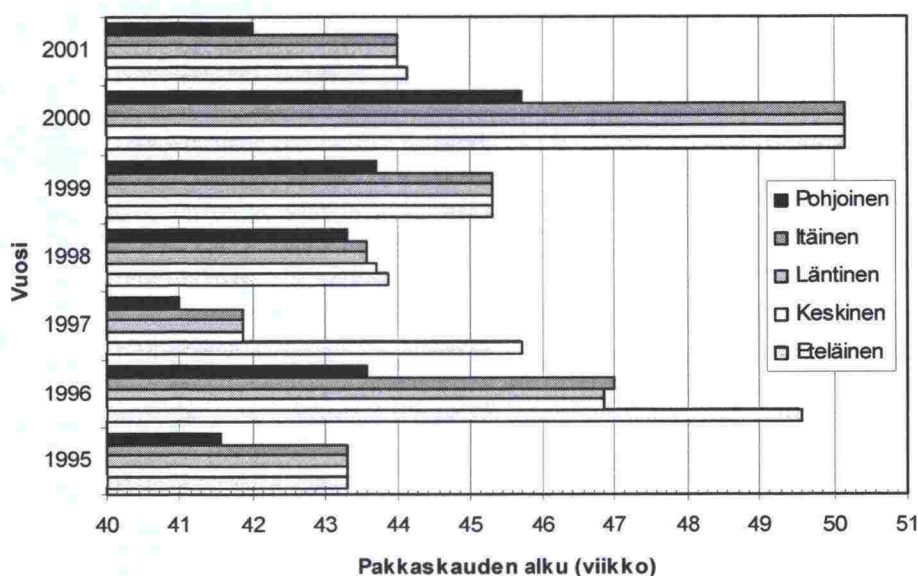
Suurin pakkasmäärä on tarkasteluajanjaksona ollut talvikaudella 1995-1996 kaikilla otosalueilla. Kolmenkymmenen vuoden tilastoissa eteläisen otosalueen talvi 1995-1996 sijoittui viiden kylmimmän talven joukkoon. Muilla otosalueilla kylmin talvi sijoittui 6-12 kylmimmän talven joukkoon (taulukko 12).

Taulukko 12. Otosalueiden pakkasmäärät.

NO	Alue	Pakkasmäärä (Kh)							Max	Med	Min
		1995- 1996	1996- 1997	1997- 1998	1998- 1999	1999- 2000	2000- 2001	2001- 2002			
1	Eteläinen	22 591	10 694	10 846	14 974	7 308	10 510	10 601	22 591	10 694	7 308
2	Läntinen	26 098	15 727	16 198	21 067	13 819	17 275	16 310	26 098	16 310	13 819
3	Keskinen	30 226	20 249	23 642	24 607	15 602	18 166	19 980	30 226	20 249	15 602
4	Itäinen	29 635	22 553	27 600	26 494	17 208	19 332	21 655	29 635	22 553	17 208
5	Pohjoinen	43 759	36 122	43 493	41 333	32 623	31 606	38 081	43 759	38 081	31 606
Mediaani		29 635	20 249	23 642	24 607	15 602	18 166	19 980	29 635	20 249	15 602

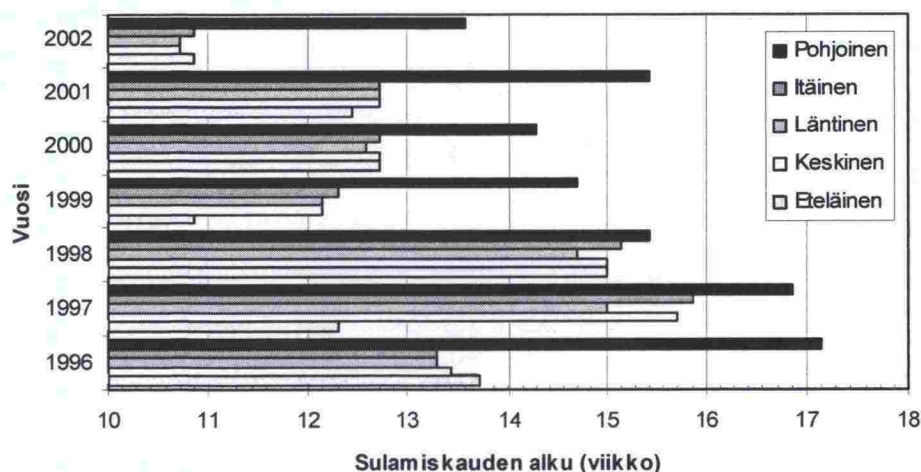
Leudoin talvi oli 1999-2000. Se sijoittui pitkän ajan tilastoissa kuuden lämpimimmän vuoden joukkoon. Pohjoisen pakkasmäärät ovat joka vuosi selvästi suurimmat. Vastaavasti eteläisen alueen pakkasmäärät olivat pienimmät. Läntisen, keskisen ja itäisen otosalueen pakkasmäärät olivat keskenään samaa suurusluokkaa.

Pakkaskausi alkoi tyypillisesti loka-marraskuun vaihteessa (viikko ~44) ja usein lähes samaan aikaan koko Suomessa. Vuonna 1996 pakkaskausi alkoi kuitenkin selvästi myöhemmin ja vuonna 2001 vasta viikolla 51. Pakkaskauden alun vaihteluväli oli Pohjois-Suomessa noin 5 viikkoa ja Etelä-Suomessa 7 viikkoa (kuva 9).



Kuva 9. Pakkaskauden alkuajankohta

Sulamiskausi alkaa keskimäärin maaliskuun lopulla viikolla 12 (kuva 10). Vuonna 1997 sulamiskausi alkoi vasta huhtikuun puolenvälin jälkeen muualla kuin Etelä-Suomessa. Pohjoisessa sulaminen alkoi tyypillisesti 2-3 viikkoa myöhemmin kuin muualla Suomessa. Sulamiskauden alku otosalueittain tarkasteltuna vaihteli 3-4 viikkoa.



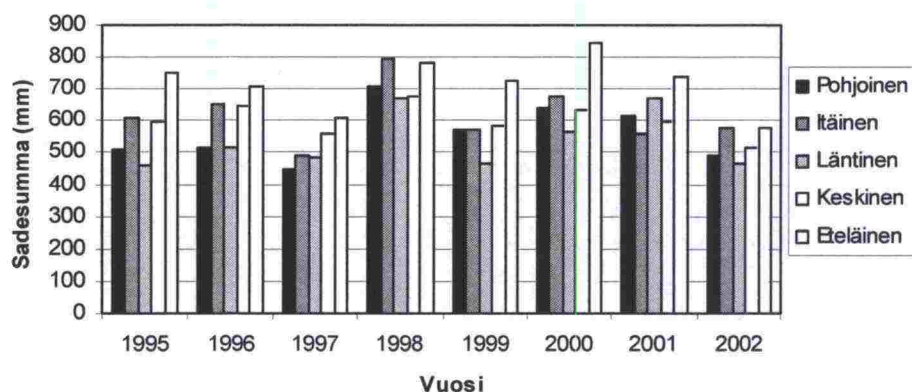
Kuva 10. Sulamiskauden alkuajankohta.

Pakkaskauden pituus oli keskimäärin 21 viikkoa (taulukko 13). Keskimäärin pakkaskausi kesti noin 20 viikkoa muualla kuin Pohjois-Suomessa, jossa pakkaskausi kesti keskimäärin noin 25 viikkoa.

Taulukko 13. Otosalueiden pakkaskauden pituudet viikkoina.

NO	Alue	1995- 1996	1996- 1997	1997- 1998	1998- 1999	1999- 2000	2000- 2001	2001- 2002	Keski- arvo
1	Eteläinen	23	15	21	19	20	15	19	19
2	Keskinen	22	21	25	21	20	15	19	20
3	Läntinen	22	20	25	21	19	15	19	20
4	Itäinen	22	21	25	21	20	15	19	20
5	Pohjoinen	28	26	27	24	23	22	24	25
	Keskiarvo	23	21	25	21	20	16	20	21

Otosalueilla satoi 449 .. 842 mm vuodessa. Keskimäärin sateisin vuosi oli 1998 (726 mm) ja vähäsateisin 1997 (519 mm). Otosalueista eniten satoi keskimäärin itäisellä ja eteläisellä otosalueella ja vähiten läntisellä otosalueella (kuva 11).



Kuva 11. Otosalueiden vuosittaiset sadesummat.

Verrattaessa sääoloja ja runkokelirikkopituutta voidaan todeta, että säätekijät eivät yksinään riitä selittämään runkokelirikon esiintymistä Suomessa. Esimerkiksi pohjoisella otosalueella on selvästi suurimmat pakkasmäärät, kylmimmät lämpötilat ja pisimmät pakkaskaudet, mutta runkokelirikkoa kuitenkin vähemmän kuin itäisellä tai läntisellä otosalueella. Vastaavasti keskisen ja itäisen otosalueen sääolot muistuttavat toisiaan, mutta keskisellä otosalueella on kuitenkin enemmän runkokelirikkoa. Todennäköisesti sääolojen lisäksi myös teiden alusrakenteet, ikä ja rakenne vaikuttavat siihen, kuinka paljon kelirikkoa otosalueella esiintyy. Mikäli halutaan muodostaa koko Suomea koskeva yhteinen malli, joudutaan säätekijöiden lisäksi käyttämään jotakin muuttujaa, joka ottaa huomioon alueelliset, teiden alusrakenteesta, iästä ja vastaavista syistä aiheutuvat erot kelirikkomäärissä.

4 Runkokelirikon ennustaminen

4.1 Muuttujat

Runkokelirikkoa pyritään ennustamaan säatekijöillä ja keskimääräisellä vauriopituudella, joka kuvaa alueellisia runkokelirikkomäärien eroja. Säatekijät tunnetaan pitkältä ajalta ja ne kattavat hyvin koko Suomen ilmastoalueet. Lisäksi säätietojen mittaus on reaaliaikaista, joten ne ovat aina saatavissa ennustetta varten. Aiemmassa tutkimuksessa muodostui käsitys, että routaantumisajalla on tärkeä vaikutus runkokelirikon määrään. Sulamisen nopeus, sadanta sulamisaikana sekä ennen routaantumishetkeä vaikuttivat myös runkokelirikkoon. Pakkasmäärän merkitys on ollut josain määrin epäselvää, mutta tekijä on mukana, jotta sen merkitystä voidaan arvioida myös tässä aineistossa. Pakkasmäärällä on merkitystä ainakin siinä ääritapauksessa, että jos routaantumista ei tapahdu lainkaan ei esiinny myöskään runkokelirikkoa.

Käsittelyssä aineistosta laskettiin aluksi otosalueiden säatekijät (taulukko 14) ja vauriopituudet. Aineisto analysoitiin tehtiin SPSS –tilasto-ohjelmistolla käyttäen hyväksi lineaarista regressionanalyysiä ja ohjelmiston kykyä poimia selittävien muuttujien joukosta ne, jotka tilastollisesti selittävät parhaiten selitettävää muuttujaa eli otosalueen runkokelirikon pituutta tietynä vuonna.

Taulukko 14. Säatekijät, niiden määrittelyt ja muuttujanimet

Selite	Yksikkö	Nimi
Routaantumisajan 2 500 - 7 000 Kh keskiarvolämpötila	°C	PK-2500-7000 keskipakkanen
Sadesumma 30 vuorokaudelta ennen pakkaskauden alkua	mm	PK-30 sadesumma
Sadesumma 90 vuorokaudelta ennen pakkaskauden alkua	mm	PK-90 sadesumma
30 vuoden tilaston keskimääräinen (mediaani) pakkasumma	Kh	PK-Keskimääräinen pakkasumma
Pakkaskauden vuorokausien lukumäärä, jolloin vuorokauden keskilämpötila on ollut yli +2°C	vrk	PK-Lämpimät
Pakkaskauden pakkasumma	Kh	PK-Pakkasumma
Pakkaskauden pituus	vrk	PK-Pituus
Pakkaskauden ensimmäisen päivän järjestysnumero vuoden alusta	vrk	PK-Päiväys JNO
Pakkaskauden keskiarvolämpötila	°C	PK-Routa-ajan keskipakkanen
Pakkasmäärän kasvuun 2 500 - 12 000 Kh kuluva aika	vrk	PK-Routaantumisaika
Pakkasmäärän kasvuun 2 500 - 6 000 Kh kuluva aika	vrk	PK-Routaantumisaika 2500-6000
Pakkasmäärän kasvuun 2 500 - 7 000 Kh kuluva aika	vrk	PK-Routaantumisaika 2500-7000
Pakkasmäärän kasvuun 3 000 - 6 000 Kh kuluva aika	vrk	PK-Routaantumisaika 3000-6000
Sulamisen alkamisesta lähtien laskettu 30 vuorokauden lämpösumma	Kh	SK-Lämpösumma 30 vrk
Sulamiseen kuluva aika, jolloin lämpösumma kasvaa 1 500 - 7 500 Kh	vrk	SK-Pituus
Sulamiskaudella sen päivän järjestysnumero vuoden alusta, jona lämpösumma saavuttaa 1 500 Kh arvon	vrk	SK-Päiväys 1500 JNO
Sulamiskauden alkua jankohdan päivän järjestysnumero vuoden alusta	vrk	SK-Päiväys JNO
Sulamiskaudella 1 500 - 7 500 Kh kuluvan ajan sadesumma	mm	SK-Sadesumma
Sulamisen alkamisesta lähtien laskettu 30 vuorokauden sadesumma	mm	SK-Sadesumma 30 vrk
Toukokuun alkua edeltävä 12 kuukauden sadesumma	mm	SK-Sadesumma 365 vrk
Sulamiskauden (1 500 - 7 500 Kh) yöpakkasvuorokausien lukumäärä. Yöpakkasvuorokaudeksi on laskettu tilanne, jolloin vuorokauden maksimilämpötila on yli +2°C ja minimilämpötila alle -2°C	vrk	SK-Yöpakkaset
Seitsemän vuoden tilastosta (1996-2002) määritetty runkokelirikkovaurioiden mediaani otosalueella	%	Vaurioiden mediaani

Säatekijöiden määrittely aloitettiin lämpösummien laskemisella. Pakkaskauden alkukohta määritettiin etsimällä se vuorokausi, jolloin syksyn lämpösumma on suurin. Sen jälkeinen vuorokausi on ensimmäinen pakkaskauden vuorokausi. Vastaavasti sulamiskauden alkuhetki saatiin etsimällä kevään suurin pakkasmäärä ja valitsemalla

sen jälkeinen vuorokausi. Saatuja pakkaskauden alkuja ja loppuja hyväksi käyttäen laskettiin pakkas- ja lämpösummat. Niiden perusteella puolestaan voitiin määrittää loput muuttujat kuten esimerkiksi aika, jona pakkassumma kasvoi 2 500 Kelvin tunnista 7 000 Kelvin tuntiin.

Aiemmassa tutkimuksessa oli teoreettisesti laskettu, että pakkasmäärän kasvu 2 500 - 12 000 Kh vastaa roudan etenemistä 0.5 m syvyydestä 1.0 metriin. Vaikutus runkokelirikon esiintymiseen perusteltiin sillä, että roudan hidas eteneminen lisää routarintamaan imeytyvän veden määrää. Regressiota varten määritettiin myös muita hiukan erilaisten pakkasummien aikavälejä. Tavoitteena oli selvittää, selittäisikö jokin muun pakkasumman aikaväli paremmin runkokelirikon esiintymistä.

Sadesummat 30 ja 90 vuorokautta ennen pakkaskauden alkua kuvaavat maaperään tullutta kosteutta ennen routaantumista. Sulamiskauden sadesumma (SK-Sadesumma) on sateen määrä sinä aikana, jolloin lämpösumma kohoaa 1 500 Kelvin tunnista 7 500 Kelvin tuntiin ja tie sulaa 0.25 metrin syvyydeltä 0.75 metrin syvyyteen. Muuttuja "SK-sadesumma 30 vrk" on 30 vuorokauden sademäärä, joka laskeaan sulamiskauden alusta. Muuttuja "SK-sadesumma 365 vrk" vastaa vuoden aikana ennen sulamiskevättä sataneen veden määrää ja sillä pyritään kuvaamaan maaperän pohjaveden korkeutta.

Muuttujat "PK-keskimääräinen pakkasumma" ja "Vaurioiden mediaani" poikkeavat muista, vuosittain ja koealueittain määritellyistä selittävistä muuttujista. Edellinen on pakkasummien mediaani, joka on määritetty otosalueittain 30 vuoden tilastoista. Jälkimmäinen muuttuja on suhteellisten runkokelirikkovauriopituuksien mediaani ja se on määritetty nykyisestä seitsemän vuoden aineistosta otosalueittain. Vaurioiden mediaani kuvaa niitä alueellisia eroja runkokelirikkomäärissä, joihin vaikuttavat tien maaperä, tien rakenteen rakenne ja rakentamistapa sekä ilmasto. Kumpikin muuttuja on vakio kullakin otosalueella.

Tärkein selitettävä muuttuja oli runkokelirikkovauriopituus. Se on otosalueella esiintyvien kolmen eri vaurioluokan pituuksien summa, joka on jaettu otosalueen sora-tiepituudella. Toissijaisina selitettävänä muuttujina testattiin myös kunkin vaurioluokan vauriopituutta erikseen sekä vaurioluokkien 1 ja 2 vauriopituuksien summaa.

4.2 Mallit

4.21 Kevään ja syksyn tekijöistä muodostettu malli

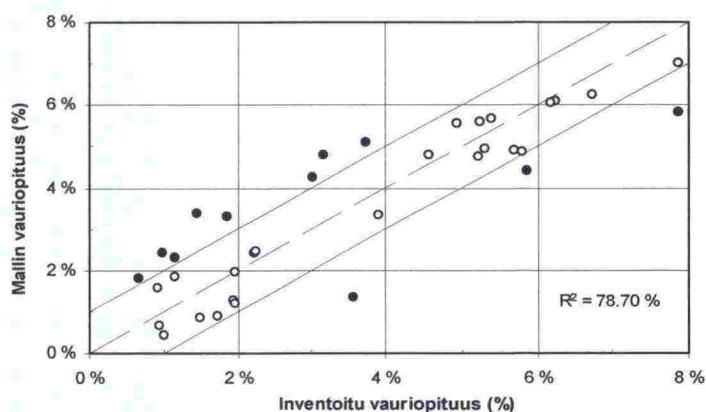
Runkokelirikon suhteellinen pituus otosalueella voidaan laskea yhtälöllä 5. Yhtälö toimii kaikilla otosalueilla ja siinä on mukana sekä syksyn että kevään säämuuttujia. Yhtälön selitysaste on 78.70 % eli noin 80 % kelirikkopituuden muutoksista selittyy yhtälössä olevien tekijöiden avulla. Merkitsevimmät selittävät muuttujat ($p = 0.000$) ovat otosalueen vauriopituuden mediaani (maaperästä, tierakenteesta sekä ilmastosta johtuvat erot otosalueiden välillä) sekä routaantumisaika ($p = 0.001$). Vähiten yhtälössä merkitsee pakkaskauden lämpimien vuorokausien lukumäärä ($p = 0.015$).

$$\text{RKR} = \text{RA} * 3.8441 * 10^{-4} + \text{VM}_{\text{MED}} * 8.5608 * 10^{-1} - \text{PKLA} * 8.3575 * 10^{-4} + \text{LS}_{30} * 5.3179 * 10^{-6} - 2.8953 * 10^{-2} \quad (5)$$

missä

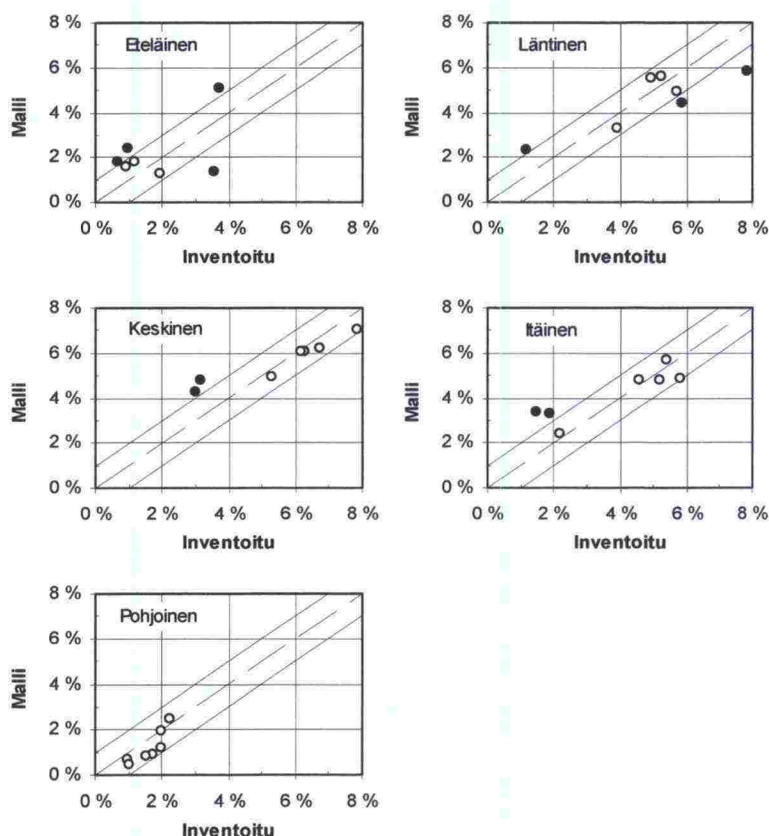
RA	= Routaantumisaika, 2 500 - 12 000 Kh,	(vrk)
VM _{MED}	= Otosalueen vauriopituuksien mediaani	(%)
PKLA	= Pakkaskauden lämpimien vuorokausien lukumäärä	(kpl)
LS ₃₀	= Sulamiskauden 30 vuorokauden lämpösumma	(Kh)

Kaavan 5 mukaan pitkä routaantumisaika, suuri keskimääräinen vauriopituus, vähäinen lämpimien vuorokausien lukumäärä pakkaskaudella ja suuri sulamiskauden lämpösumma pahentavat runkokelirikkoa. Kaikkien otosalueiden perusteella muodostettu malli toimii pääosin hyvin (kuva 12). Ero inventoitujen ja mallinnettujen runkokelirikkopituuksien välillä on suurin vähäisillä, alle 4 % kelirikkopituuksilla. Suuremmilla runkokelirikkopituuksilla mallinnetut pituudet poikkeavat vain hiukan inventoiduista pituuksista. Inventoidun ja mallinnetun vauriomäärään yhteensopivuus esitetään tässä työssä kuvilla, joiden vaaka-akselilla on inventoitu ja pystyakselilla mallinnettu vauriomäärä. Malli toimii parhaiten silloin, kun vastinpisteet ovat kuvaan piirretyn lävistäjän (katkoviiva) päällä. Lävistäjän ylä- ja alapuolella olevat viivat on piirretty yhden prosenttiyksikön yli ja alle tavoitteen ja niiden tarkoitus on helpottaa hajonnan arviointia.



Kuva 12. Kevään ja syksyn tekijöistä muodostetun mallin toimivuus.

Vähäisimmät erot inventoidun ja mallinnetun runkokelirikon välillä ovat pohjoisella otosalueella (kuva 13). Otosalueilla on kuitenkin yksittäisiä vuosia, jolloin ennuste joko yli- tai aliarvioi toteutunutta runkokelirikkopituutta. Tämä saattaa johtua joko siitä, että mallista puuttuu tekijä, jonka pitäisi olla mukana tai siitä, että inventointi tehdään eri henkilöiden toimesta, jolloin inventoijan henkilökohtainen näkemys voi vaikuttaa määrien vaihteluun. Runkokelirikon määrittely ei ole matemaattisen tarkkaa, joten inventoidut vauriomäärät vaihtelevat jonkin verran riippumatta olosuhteista.



Kuva 13. Kevään ja syksyn tekijöistä muodostetun mallin toimivuus otosalueilla.

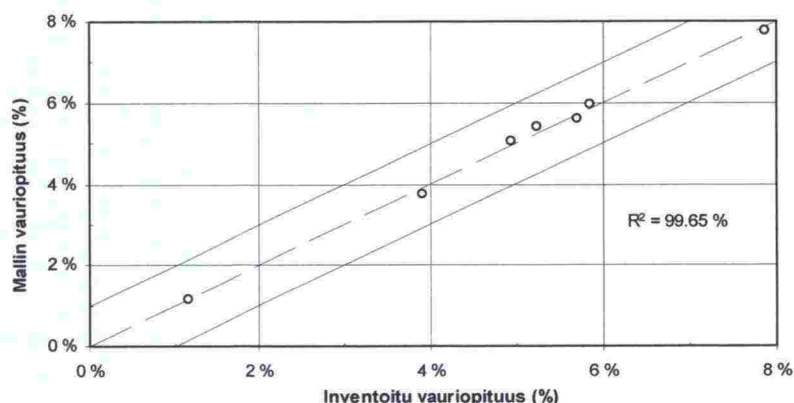
Runkokelirikkomäärien mallit määritettiin myös otosalueittain. Eteläisen ($R^2=58.7\%$), itäisen ($R^2=81.1\%$), keskisen ($R^2=95.6\%$), läntisen ($R^2=99.6\%$) ja pohjoisen ($R^2=77.2\%$) otosalueen erillisissä malleissa selittäviksi tekijöiksi valikoituivat routaantumisaajat 3 000 - 6 000 Kh tai 2 500 - 12 000 Kh, sulamiskauden 30 vuorokauden lämpösumma, pakkasumma sekä pakkaskauden lämpimien vuorokausien lukumäärä. Kaikkia otosalueita koskeva yhteinen malli muodostettiin myös näitä muuttujia käyttäen, mutta selitysaste oli vain 31.9 %.

Läntiselle otosalueelle muodostettu runkokelirikkomalli toimi poikkeuksellisen hyvin (kaava 6, kuva 14). Kolmesta tekijästä tärkein oli sulamiskauden 30 vuorokauden lämpösumma ($p=0.000$). Muut yhtälön tekijät olivat merkitsevyysjärjestyksessä vakio ($p=0.002$), pakkasumma ($p=0.003$) ja pakkaskauden aikana olleet lämpimät vuorokaudet ($p=0.008$).

$$\text{RKR}_{\text{länsi}} = \text{LS}_{30} * 1.3850 * 10^{-5} + \text{PS} * 1.9475 * 10^{-6} - \text{PKLA} * 6.1668 * 10^{-4} + 4.9557 * 10^{-2} \quad (6)$$

missä

LS_{30}	= Sulamiskauden 30 vuorokauden lämpösumma	(Kh)
PS	= Pakkasumma	(Kh)
PKLA	= Pakkaskauden lämpimät vuorokaudet	(vrk)



Kuva 14. Läntisen otosalueen runkokelirikkomallin toimivuus.

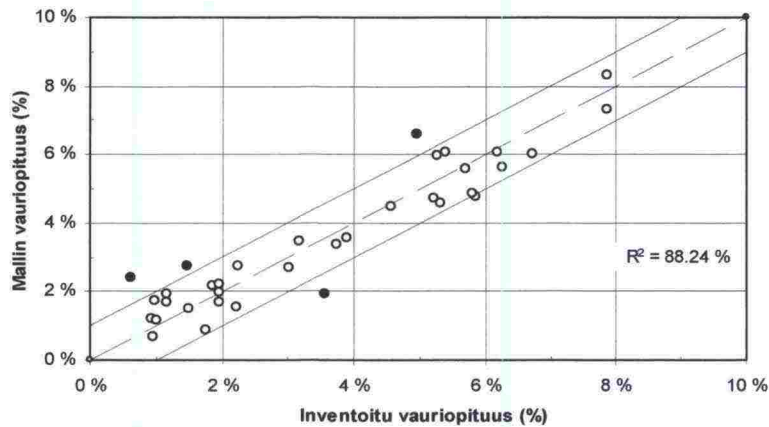
4.22 Parannettu kevään ja syksyn tekijöistä muodostettu malli

Mallissa 5 yksitoista mallin arvoa poikkesi inventoidusta arvosta enemmän kuin prosenttiyksikön. Käyttämällä aiemmin esiteltyjä muuttujia mutta erilaisia yhtälömuotoja parani selitysaste 88.3 %:iin (kaava 7). Sulamiskauden lämpösumman ja otosalueen vauriopituuden mediaanin tulo on erittäin merkitsevä tekijä ($p = 0.000$). Nopea sulaminen keväällä on sitä haitallisempaa, mitä herkempää alueen maaperä ja tiestö ovat runkokelirikolle. Kasvava sulamiskauden lämpösumma huononsi runkokelirikotilannetta eniten niillä alueilla, jotka olivat muutenkin herkkiä runkokelirikolle. Otosalueen vuosittaisen routaantumisaajan ja otosalueen routaantumisaikojen mediaanin erotus on myös erittäin merkitsevä tekijä ($p = 0.000$). Vähiten merkitsi sulamiskauden alkuaikajankohda ($p = 0.007$).

$$\begin{aligned} RKR_B = & LS_{30} * VM_{MED} * 2.4202 * 10^{-4} - SK_{JNO} * 3.4186 * 10^{-4} + \\ & (RA - RA_{MED}) * 3.7433 * 10^{-4} - \\ & (PKLA - PKLA_{MED}) * 9.8751 * 10^{-4} + 4.1506 * 10^{-2} \end{aligned} \quad (7)$$

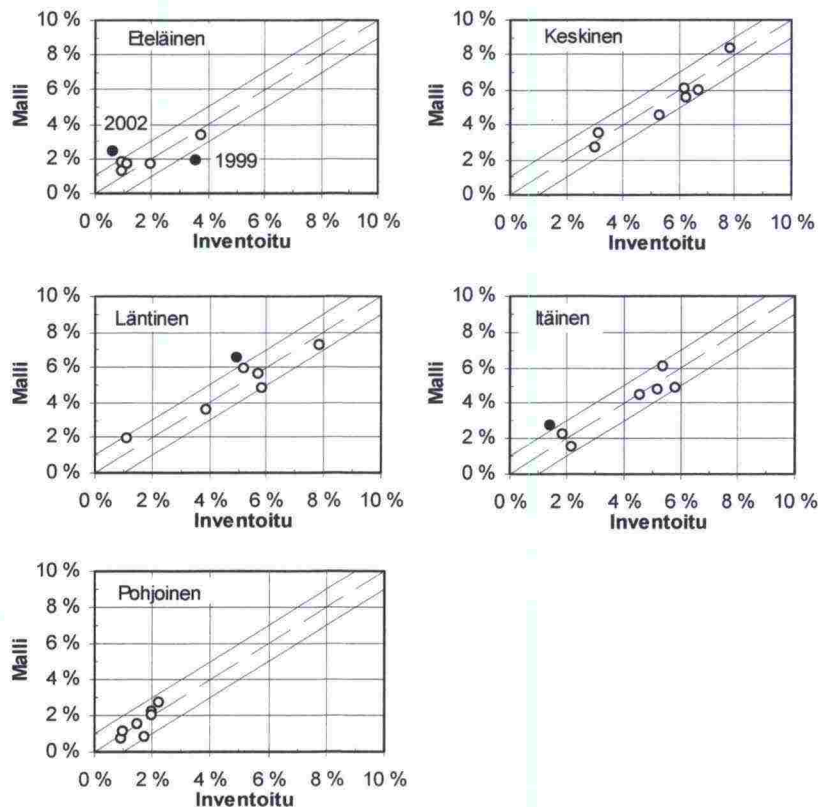
missä	LS_{30}	= Sulamiskauden 30 vuorokauden lämpösumma	(Kh)
	VM_{MED}	= Otosalueen vauriopituuksien mediaani	(%)
	SK_{JNO}	= Sulamiskauden ensimmäisen päivän järjestysnumero	
	RA	= Routaantumisaika, 2 500 - 12 000 Kh,	(vrk)
	RA_{MED}	= Otosalueen routaantumisaikojen mediaani, 2 500 - 12 000 Kh	(vrk)
	$PKLA$	= Pakkaskauden lämpimien vuorokausien lukumäärä	(vrk)
	$PKLA_{MED}$	= Otosalueen pakkaskauden lämpimien vuorokausien lukumäärien mediaani	(vrk)

Yhtälön 7 inventoinneista enemmän kuin prosenttiyksikön poikkeavien mallipisteiden lukumäärä putosi neljään (kuva 15). Suurin ero malliin 5 verrattuna ovat yhtälössä käytetyt keskimääräiset arvot (mediaanit), jotka skaalaavat muuttujat eri tavalla kuin absoluuttiset arvot.



Kuva 15. Kevään ja syksyn tekijöistä muodostetun parannnetun mallin toimivuus.

Mallin 7 ennustamat vauriomäärät vastasivat inventoituja vauriomääriä otosalueilla erittäin hyvin (kuva 16). Eteläisellä otosalueella vuoden 1999 ennuste aliarvioi ja vuoden 2002 ennuste yliarvioi vauriomääriä. Syy johtunee siitä, että eteläisellä otosalueella pakkassumma oli usein vähemmän kuin 12 000 Kh. Tällöin routaantumisaikaksi 2 500 - 12 000 Kh määrytyi lähes koko pakkaskausi, minkä takia muuttujan vuosien väliset erot olivat vähäisiä ja kyky selittää muutoksia heikko. Sen sijaan routaantumisaika 2 500 - 6 000 Kh oli vuonna 1999 kaksinkertainen verrattuna vuoteen 2002 eli kapeammalta pakkasmääräväliltä määritetty routaantumisaika kykenee selittämään poikkeavat eteläisen otosalueen malliarvot.



Kuva 16. Kevään ja syksyn tekijöistä muodostetun parannnetun mallin toimivuus otosalueilla.

Läntisellä ja itäisellä otosalueella oli kummassakin yksi enemmän kuin prosenttiyksikön inventoidusta vauriomäärästä poikkeava arvo. Poikkeamille ei löydetty selitystä.

4.23 Syksyn tekijöistä muodostettu malli

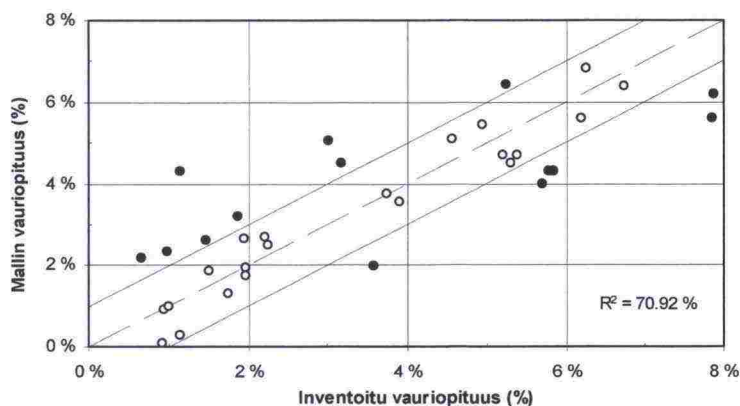
Ennakoitaessa talvella ennen kevättä runkokelirikon rankkuutta, ei mallissa saa olla kevään tai sellaisia talven säätekijöitä, joita ei ennustetta tehdessä vielä tunneta. Syksyn mallin tekijöiksi valikoituivat routaantumisaika, otosalueen vauriopituuden mediaani ja otosalueen pitkän ajanjakson pakkasmäärän mediaani. Yhtälön selityssaste on 70.92 %. Routaantumisaika ja vauriopituuden mediaani olivat erittäin merkitseviä ($p = 0.000$) tekijöitä ja pakkasmäärän mediaani vähiten merkitsevä ($p = 0.034$) (kaava 8).

$$\text{RKR}_S = \text{RA} * 6.2929 * 10^{-4} + \text{VM}_{\text{MED}} * 9.0912 * 10^{-1} + \text{PS}_{30v} * 6.9649 * 10^{-7} - 5.2879 * 10^{-2} \quad (8)$$

missä

- RA = Routaantumisaika, 2 500 - 12 000 Kh, (vrk)
 VM_{MED} = Otosalueen vauriopituuksien mediaani (%)
 PS_{30v} = Otosalueen 30 vuoden tilaston pakkasmäärien mediaani (Kh)

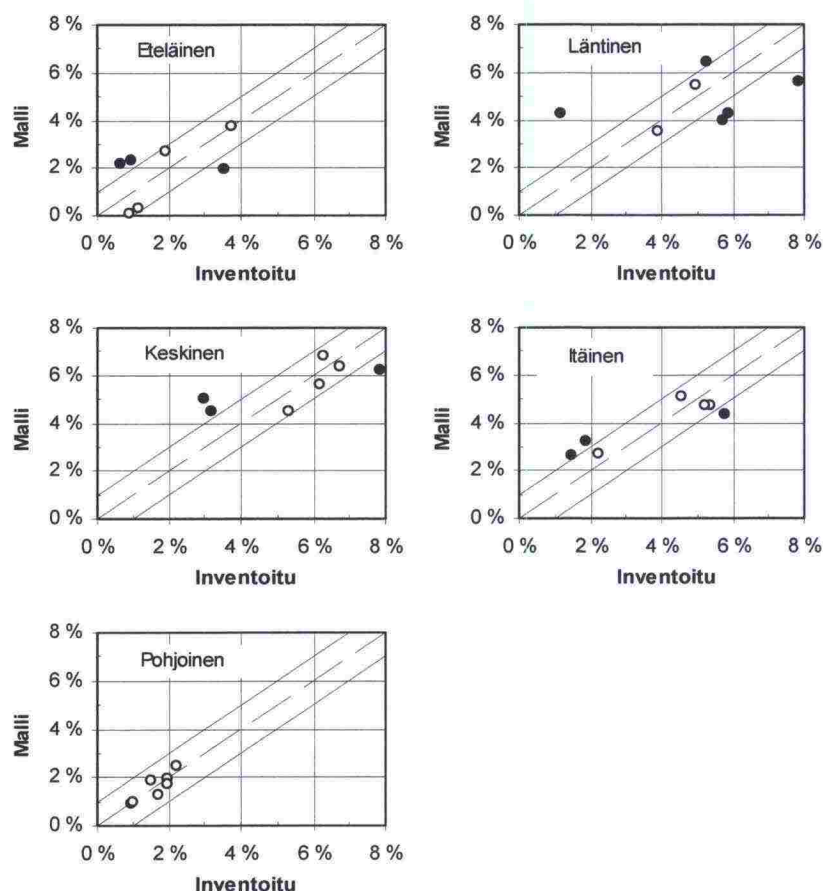
Pitkä routaantumisaika pahentaa runkokelirikkoa, kuten malleissa 5 ja 7. Pakkasmäärän mediaanin toiminta yhtälössä on samankaltainen kuin vauriopituuden mediaanin eli molemmat voivat vaikuttaa ainoastaan otosalueitten välisiin eroihin, mutta ne eivät voi vaikuttaa eri vuosien välisiin eroihin otosalueen sisällä. Muuttujat eivät kuitenkaan korreloi toistensa kanssa lainkaan ($r = -9.5\%$). Tässä ja malleissa 5 kaksi merkittävintä tekijää ovat samat, joten hajontakuviot muistuttavat toisiaan (kuva 17).



Kuva 17. Syksyn tekijöistä muodostetun mallin toimivuus.

Otosalueittain ennustettu ja inventoitu vauriopituus sopivat kohtuullisen hyvin yhteen (kuva 18). Kevään tekijöiden poisjättäminen heikensi eniten läntisen otosalueen mallin ja inventoinnin välistä riippuvuutta, sillä läntisen otosalueen korrelaatio huononee 85.5 - 89.3 prosentista 39.7 prosenttiin. Eteläisen, itäisen ja pohjoisen otosalueen syksyennusteet olivat jopa hiukan parempia kuin kokovuoden ennusteet.

Mallin 5 ja parannetun mallin 7 korrelaatioiden muutokset verrattuna syksymalliin olivat samaa suurusluokkaa.



Kuva 18. Syksyn tekijöiden perusteella muodostetun runkokelirikkoennusteen (kaava 8) toiminta otosalueilla.

Runkokelirikkoennuste voitiin muodostaa syksyn säätekijöiden perusteella kullekin otosalueelle erikseen ainoastaan eteläiselle ($R^2 = 58.7\%$), itäiselle ($R^2 = 81.1\%$) ja läntiselle ($R^2 = 77.2\%$) otosalueelle. Selittävinä tekijöinä olivat routaantumisaajat 3 000 - 6 000 tai 2 500 - 12 000 Kh. Muiden otosalueiden ennusteille ei löytynyt yhtään riittävän hyvää selittäjää.

4.24 Malli eri vaurioluokille

Runkokelirikkomallin muodostamista testattiin myös kullekin vaurioluokalle erikseen. Vaurioluokissa 1 ja 2 on selvästi vähemmän inventoitua runkokelirikkopituutta kuin luokassa 3. Tällöin eri syistä aiheutuvat satunnaiset vaihtelut inventointimäärissä vaikeuttavat regression muodostamista ja pienentävät selityssastetta. Vaurioluokassa 1 ($R^2 = 11.3\%$) ja 2 ($R^2 = 35.9\%$) runkokelirikkopituuksien vaihtelu selittyi säätekijöillä huonosti. Vaurioluokassa 3 selityssaste oli 66.8 % ja selittävät tekijät olivat vaurioiden mediaani, routaantumisaika ja pakkaskauden lämpimien vuorokausien lukumäärä. Vaurioluokan 3 vaurioiden määrä korreloi kokonaisvauriomäärän kanssa ($r = 83.8\%$), mikä selittää muita vaurioluokkia paremman selityssasteen.

4.3 Kuivatuspuutteet ja runkokelirikko

Erilaiset kuivatuspuutteet on kirjattu runkokelirikkotietokannan soratietaulukkoon. Siinä on merkinnät ojituspuutteesta tien oikealla tai vasemmalla puolella, rummun puuttumisesta, rummun tukkoisuudesta ja laskuojan puutteesta. Ojituspuutteen pituus on kirjattu metreinä, mutta rumpuongelmat ja puuttuvat laskuojat on kirjattu yleensä vain pisteenä. Rumpu- ja laskuojaongelmien vaikutusalueet määriteltiin siten, että puuttuva tai tukossa oleva rumpu sekä puuttuva laskuoja vaikuttavat 50 m ennen ja jälkeen ongelmakohdan. Eri kuivatusongelmien vaikutuspituudet yhdistettiin siten, että erilaiset kuivatuspuutteet kirjautuvat vain yhden kerran tiepituutta kohden ja korjattiin tierekisteriä hyväksikäyttäen mahdolliset ojituspuutekohtien alut ja loput vastaamaan tieosien alku/loppukohtia. Tämän jälkeen kohdistettiin runkokelirikot ja kuivatuspuutteet toisiinsa ja saatiin selville, kuinka paljon kuivatuspuutteita on runkokelirikkokohteilla.

Kuivatuspuutepituuksien yhdistämisen ja pituuksien siistimisen jälkeen kirjattuja ojituspuutteita esiintyi 23 868 kappaletta. Inventointia ei ole tehty kaikissa piireissä eikä kaikkina vuosina. Vertailuaineiston kasvattamiseksi vertailtiin kuivatuspuutteiden sijoittumista sorateiden runkokelirikkokohteille otosalueiden sijasta koko piirin alueella. Kuivatuspuutteita useampana vuotena on kirjattu ainoastaan Savo-Karjalan, Vaasan ja Lapin tiepiireissä. Tyypillisesti tiepiireissä on kuivatuspuutteita sorateilla noin 100 - 200 km matkalla. Keski-Suomen tiepiiristä on merkitty ainoastaan yksi ojituspuutekohta (taulukko 15).

Taulukko 15. *Inventoitujen kuivatuspuutteiden kokonaismäärät tiepiireissä.*

Piiri	1998		1999		2000		2001	
	pituus (m)	Määrä (kpl)	pituus (m)	määrä (kpl)	pituus (m)	määrä (kpl)	pituus (m)	määrä (kpl)
Savo-Karjala	21 250	192	16 239	230	107 612	485	17 891	380
Keski-Suomi	70	1						
Vaasa	138 763	1 682	169 099	2 805	89 505	2 143	103 822	2 628
Oulu	162 469	4 784						
Lappi	247 000	2 554	116 335	1 672	137 968	1 983	142 270	2 329

Runkokelirikkokohdat ja kuivatuspuutekohdat eivät pääosin olleet samoilla tien kohdilla (taulukko 16). Esimerkiksi Lapin tiepiirissä vuonna oli 1998 kuivatuspuutteita runkokelirikkokohteilla 5.5 km ja muulla soratiestöllä 241.5 km matkalla. Käsitellyssä olleiden inventointitietojen mukaan runkokelirikon esiintymiseen vaikuttavat suurelta osin muut syyt, kuin puutteet kuivatuksessa. Luultavasti mahdolliset kuivatuspuutteet pyritään korjaamaan jo ennakolta potentiaalisilta runkokelirikkokohdilta.

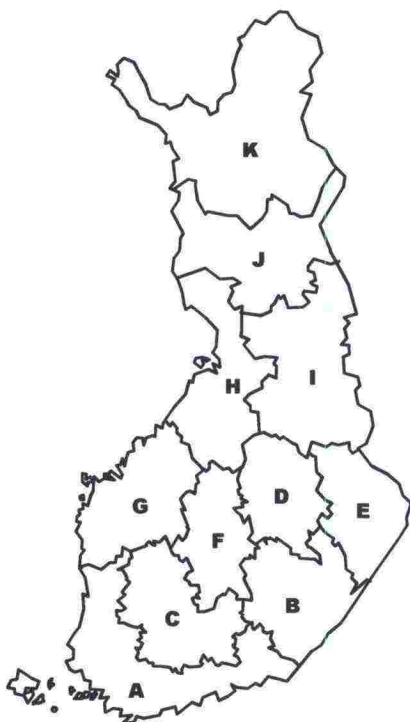
Taulukko 16. *Runkokelirikkokohteiden ja kuivatuspuutteiden yhteinen pituus ja kuivatuspuutepituuden osuus runkokelirikkovauriopituuksista piireittäin.*

Piiri	1998		1999		2000		2001	
	pituus (m)	osuus (%)	pituus (m)	osuus (%)	pituus (m)	osuus (%)	pituus (m)	osuus (%)
Savo-Karjala	2 741	1.1 %	904	0.4 %	916	0.5 %	128	0.0 %
Vaasa	21 096	6.9 %	10 920	8.2 %	5 232	4.1 %	6 100	4.1 %
Oulu	6 346	3.1 %						
Lappi	5 449	13.4 %	2 589	9.1 %	1 412	6.9 %	694	1.8 %

4.4 Ehdotus runkokelirikon ennustamiseksi

4.41 Aluejako ja muuttujat

Runkokelirikkomallien muodostaminen perustui viiden otosalueen havaintoihin. Viiden otosalueen muuttuja-arvot eivät kuvaa riittävän tarkasti kaikkia alueita Suomessa, joten ennustemenettelyä varten Suomi jaettiin 11 osa-alueeseen (kuva 19, taulukko 17), joissa kussakin runkokelirikkoon vaikuttavien tekijöiden oletettiin olevan jokseenkin samankaltaisia.



Kuva 19. Ennustemenettelyn 11 osa-alueita.

Taulukko 17. Ennustemenettelyn osa-aluejako ja soratiepituudet.

Tunnus	Osa-alue	Sisältää	Soratiepituus (km)
A	Etelärannikko	Uudenmaan ja Turun tiepiirit sekä Kaakkois-Suomen tiepiiristä Kymenlaakson maakunta	3542 km
B	Etelä-Savo ja Etelä-Karjala	Kaakkois-Suomen tiepiiristä Etelä-Karjalan ja Etelä-Savon maakunnat	3023 km
C	Häme	Hämeen tiepiiri	2972 km
D	Pohjois-Savo	Savo-Karjalan tiepiiristä Pohjois-Savon maakunta	2823 km
E	Pohjois-Karjala	Savo-Karjalan tiepiiristä Pohjois-Karjalan maakunta	2356 km
F	Keski-Suomi	Keski-Suomen tiepiiri	2408 km
G	Etelä- ja Keski-Pohjanmaa	Vaasan tiepiiri	2951 km
H	Pohjois-Pohjanmaa ja Perämeren kunnat	Oulun tiepiiristä Pohjois-Pohjanmaan maakunta paitsi Pudasjärven, Taivalkosken ja Kuusamon kunnat sekä Lapin tiepiiristä Kemijärven, Tornio, Tervola ja Simo	1950 km
I	Kainuu ja Koillismaa	Oulun tiepiiristä Kainuun maakunta sekä Pudasjärven, Taivalkosken ja Kuusamon kunnat	2901 km
J	Etelä-Lappi	Lapin tiepiiristä Kolari, Pello, Ylitornio, Rovaniemen maalaiskunta, Ranua, Posio, Kemijärvi, Salla ja Pelkosenniemi	1896 km
K	Pohjois-Lappi	Lapin tiepiiristä Muonio, Kittilä, Sodankylä, Savukoski, Enontekiö, Inari ja Utsjoki	861 km

Alueiden suhteelliset runkokelirikkomäärät laskettiin inventointitietojen ja soratiepituuksien perusteella (taulukko 18). Vauriomäärien vuosittainen vaihtelu Kainuun ja Koillismaan sekä Pohjois-Lapin osa-alueilla oli poikkeuksellisen suurta. Kainuun ja Koillismaan vuoden 1998 suhteellinen vauriomäärä oli kymmenkertainen muihin vuosiin verrattuna. Vauriomäärä oli poikkeavana vuonna 132 km, kun se muina vuosina oli hiukan yli 10 km. Pohjois-Lapin vuosien 1996 ja 1997 vauriomäärä oli myös huomattavan suuri verrattuna myöhempiin vuosiin. Vauriomäärä 1996 oli 30 km ja 1997 70 km mutta myöhempinä vuosina ainoastaan 6-8 km. Alkuvuosien poikkeuksellisten vauriomäärien syynä on luultavasti silloinen inventointitapa.

Taulukko 18. Suhteelliset vauriopituudet osa-alueilla vuosittain.

Osa-alue	Vuosi							Keski-arvo
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	
Etelärannikko	2.09 %	2.82 %	2.68 %	2.24 %	2.25 %	1.90 %	0.47 %	2.24 %
Etelä-Savo ja Etelä-Karjala	1.76 %	4.28 %	2.21 %	2.83 %	1.75 %	3.15 %	1.53 %	2.21 %
Häme	1.47 %	1.80 %	12.22 %	4.72 %	8.98 %	5.32 %	1.30 %	4.72 %
Pohjois-Savo	1.83 %	1.41 %	5.45 %	5.24 %	4.63 %	5.86 %	2.24 %	4.63 %
Pohjois-Karjala	7.79 %	5.27 %	3.57 %	2.77 %	3.06 %	5.37 %	2.96 %	3.57 %
Keski-Suomi	3.06 %	5.15 %	7.58 %	6.59 %	6.17 %	6.09 %	2.99 %	6.09 %
Etelä- ja Keski-Pohjanmaa	2.43 %	8.04 %	10.14 %	4.18 %	4.22 %	5.00 %	2.84 %	4.22 %
Pohjois-Pohjanmaa ja Perämeren kunnat	3.29 %	2.52 %	3.47 %	1.39 %	1.75 %	1.90 %	1.27 %	1.90 %
Kainuu ja Koillismaa	1.09 %	0.47 %	4.55 %	0.31 %	0.38 %	0.40 %	0.40 %	0.40 %
Etelä-Lappi	0.99 %	0.63 %	1.54 %	0.94 %	0.73 %	1.38 %	1.40 %	0.99 %
Pohjois-Lappi	3.49 %	8.14 %	0.77 %	0.91 %	0.41 %	0.72 %	0.90 %	0.90 %
Keskiarvo	2.09 %	2.82 %	3.57 %	2.77 %	2.25 %	3.15 %	1.40 %	2.77 %

Säämuuttujat laskettiin joko suoraan otosalueella olevan sääaseman säähavainnoista tai ympäröivien otosalueiden keskiarvoina (taulukko 19). Esimerkiksi Hämeen tiepiiriin (osa-alue C) pakkasmäärä saatiin laskemalla keskiarvo Suomensjärven (A), Ylistaron (G) ja Jyväskylän (F) sääasemilta määritetyistä pakkasmääristä. Säämuuttujien keskiarvomääritys oli koeluonteinen ja lopullisessa soveltamisessa säämuuttujat tulee määrittää osa-alueella olevan säähavaintoaseman tietojen perusteella.

Taulukko 19. Säämuuttujien määrittäminen.

Tunnus	Osa-alue	Säämuuttujat määritetty	
		Mittausasemalta	Laskemalla
A	Etelärannikko	Suomensjärvi Taipale (otosalue 1)	$(A+D+F)/3$ $(A+F+G)/3$
B	Etelä-Savo ja Etelä-Karjala		
C	Häme		
D	Pohjois-Savo	Kuopio Lentoasema/Siilinjärvi (otosalue 4)	D
E	Pohjois-Karjala		
F	Keski-Suomi	Jyväskylä Lentoasema/Jyväskylä (otosalue 3)	$(G+J)/2$ $(D+J)/2$
G	Etelä- ja Keski-Pohjanmaa		
H	Pohjois-Pohjanmaa ja Perämeren kunnat	Rovaniemen Mlk Apukka (otosalue 5)	J
I	Kainuu ja Koillismaa		
J	Etelä-Lappi		
K	Pohjois-Lappi		

Ennustemenettelyyn parhaiten soveltuvat yhtälöt on esitetty kaavoissa 7 (parannettu kevään ja syksyn malli) ja 8 (syksymalli). Sulamiskauden 30 vuorokauden lämpösumma, sulamiskauden ensimmäisen päivän järjestysnumero, routaantumisaika ja pakkaskauden lämpimien vuorokausien lukumäärä määritettiin osa-alueen sääaseman havainnoista kyseiseltä ennustevuodelta. Loput yhtälöissä olevat säättekijät olivat seitsemän vuoden (aikajakso 1996 - 2002) keskimääräisiä arvoja eli mediaaneja, joita voidaan pitää vakioina (taulukko 20).

Taulukko 20. Osa-alueiden malleissa käytetyt ns. vakioarvot.

Tunnus	Osa-alue	VM _{MED} (%)	RA _{MED} (vrk)	PKLA _{MED} (vrk)	PS _{30V} (Kh)	Arvot tulee määrittää sovel- lettaessa uudel- leen
A	Etelärannikko	2.24 %	86	10	14148	
B	Etelä-Savo ja Etelä-Karjala	2.21 %	56	5	22305	Kyllä
C	Häme	4.72 %	62	11	20158	Kyllä
D	Pohjois-Savo	4.57 %	57	3	26690	
E	Pohjois-Karjala	3.57 %	57	3	26690	Kyllä
F	Keski-Suomi	6.09 %	55	5	26076	
G	Etelä- ja Keski-Pohjanmaa	4.22 %	54	11	20251	Ehkä
H	Pohjois-Pohjanmaa ja Perämeren kunnat	1.90 %	46	8	31012	Kyllä
I	Kainuu ja Koillismaa	0.40 %	49	3	34231	Kyllä
J	Etelä-Lappi	0.99 %	40	4	41772	
K	Pohjois-Lappi	0.90 %	40	4	41772	Kyllä

VM_{MED} = Osa-alueen suhteellisen vauriopituuden mediaani vuosilta 1996 - 2002
 RA_{MED} = Osa-alueen routaantumisaikojen mediaani vuosilta 1996-2002
 PKLA_{MED} = Osa-alueen pakkaskaudella olleiden lämpimien vuorokausien mediaani vuosilta 1996-2002
 PS_{30V} = Osa-alueen pakkasmäärän mediaani 30 vuoden aikajaksolta

4.42 Parannetun kevään ja syksyn tekijöistä muodostetun mallin toiminta osa-alueilla

Parannettu syksyn ja kevään selittävästä tekijöistä muodostettu malli (kaava 7) toimii erittäin hyvin Pohjois-Savon, Keski-Suomen ja Etelä-Lapin osa-alueilla ja loppuilla-kin vähintään kohtuullisesti, kun otetaan huomioon seuraavat varaukset (kuva 20).

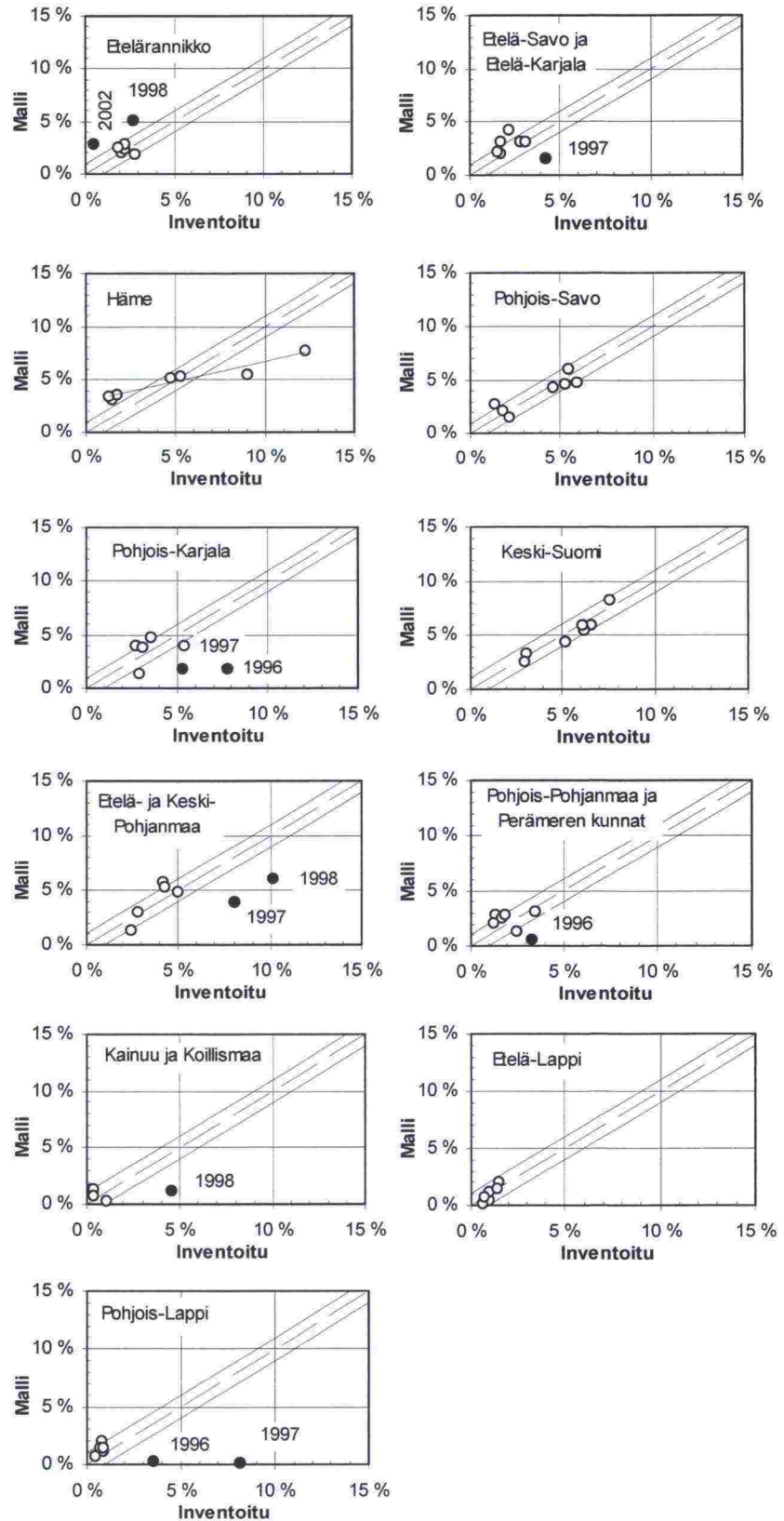
- Poikkeavat arvot ovat yleensä alkupään vuosilta.
- Ilmastomuuttujat tulisi määrittää osa-alueella olevan sääaseman tiedoista. Säämuuttujat voivat keskimäärin olla hyvinkin laskettavissa ympäröivien alueiden arvoista, mutta silloin tällöin esiintyy vuosia, jolloin verranto ympäröiviin alueisiin poikkeaa tavanomaisesta.

Etelärannikon vuosien 1998 ja 2002 mallipisteet ennustivat pahempaa kelirikkoa, kuin se todellisuudessa oli. Vuosi 1998 oli Suomessa hankala kelirikkovuosi. Ilmeisesti selittävälle muuttujalle on olemassa ääriarvot, joita lähestyttäessä kelirikkomäärän kasvu hidastuu. Kyseinen seikka voitaisiin ottaa huomioon malleissa sopivan muotoisella käyrällä, mutta sitä varten lähtöarvoja pitäisi olla enemmän ja ennen kaikkea niissä ei saisi juurikaan olla satunnaista hajontaa.

Etelä-Savon ja Etelä-Karjalan osa-alueen lämpötilatiedot ovat "laskennallisia". Muut paitsi vuoden 1997 ennusteet toimivat hyvin.

Hämeen osa-alueen mallin mukaiset suhteelliset vauriomäärät olivat lähes samalla suoralla, jonka kaltevuus kuitenkin poikkesi mallista. Poikkeama johtunee säämuuttujien laskennallisesta määrittelystä. Luultavasti syksyn ja talven sää Hämeessä muistuttaa enemmän Keski-Suomen kuin etelärannikon säätä ja kevään lämpösumma eteläisestä sijainnista johtuen muistuttaa puolestaan enemmän etelärannikon kuin Keski-Suomen säätä. Mallin toiminta Hämeen alueella paranisi käyttämällä säämuuttujien määrittelyyn oikeaa alueella sijaitsevaa sääasemaa.

Runkokelirikon ennustaminen



Kuva 20. Parannetun mallin 7 toiminta yhdellätoista osa-alueella. Mallissa on mukana sekä syksyn että kevään selittävät muuttujat.

Pohjois-Karjalan alkuvuosien 1996 ja 1997 mallipisteet erosivat mallista selvästi. Pohjois-Karjalan alueella käytettiin Pohjois-Savon lämpötilamuuttujia. Paremmin aluetta vastaava säähavaintopiste saattaisi myös osaltaan parantaa mallin toimivuutta.

Malli aliarvioi vuosien 1997 ja 1998 Etelä- ja Keskipohjanmaan vauriomääriä. Säämuuttujat on määritetty Vaasan tiepiirin alueelta, mutta ilmeisesti yksi alue ja säähavaintopaikka eivät riitä, vaan alue pitäisi jakaa vähintään kahteen osaan; sisämaan alue ja rannikkokaista. Molemmissa tulisi olla oma säähavaintopiste.

Kainuun ja Koillismaan vuoden 1998 sekä Pohjois-Lapin vuosien 1996 ja 1997 inventoidut vauriomäärät olivat jopa kymmenkertaisia myöhempien vuosien vauriomääriin. Mallin virhe ei myöhempinä vuosina, eikä luultavasti tulevaisuudessaakaan, ole näin suuri.

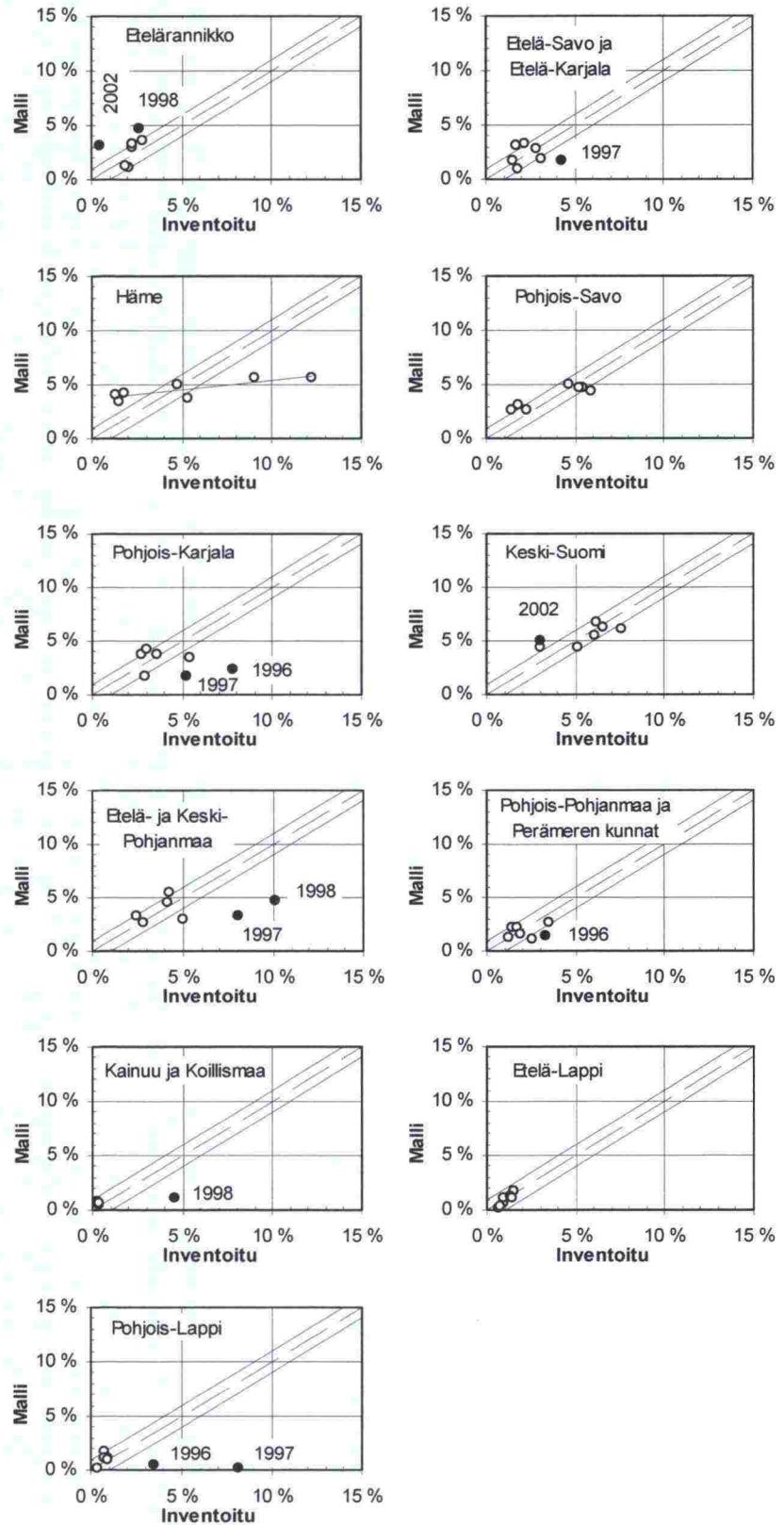
4.43 Syksyn tekijöistä muodostetun mallin toiminta osa-alueilla

Syksyn tekijöistä muodostettu ennuste (kaava 8) oli keskimäärin hiukan heikompi kuin kokovuoden tekijöistä muodostettu ennuste. Eniten inventoinneista poikkeavat ennustepisteet olivat samalta vuodelta molemmissa ennusteissa. Parhaiten toimivat Etelä-Savon - Etelä-Karjalan, Pohjois-Savon, Keski-Suomen, Pohjois-Pohjanmaan ja Perämeren kuntien sekä Etelä-Lapin ennusteet.

Yksittäisiä ennusteen ja toteutuneen kelirikkomäärän eroja voidaan selittää pääosin samoilla syillä, kuin koko vuoden parannetussa mallissakin (kuva 21):

- Kelirikkomäärän nopea ja pysyvä putouksenomainen väheneminen alkuvuosien määrästä (esim. Pohjois-Lappi, Kainuu ja Koillismaa, Pohjois-Karjala).
- Osa-alueelle ympäröivien osa-alueiden keskiarvona määritetyt säämuuttujat eivät kuvaa kaikissa tapauksissa riittävän hyvin todellisia säätekijöitä (esim. Häme, Pohjois-Karjala)
- Rannikon läheisyys vaikuttaa säätekijöihin, mikä ehkä pitäisi ottaa huomioon osa-aluejaossa tarkemmin. Esimerkiksi läntisen otosalueen malli sopi oikein hyvin yhteen inventointitietojen kanssa (kuva 13). Yhteensopivuus heikkeni merkittävästi, kun muodostettiin Etelä- ja Keski-Pohjanmaan osa-alue, jolloin alueeseen tuli mukaan mm. Vaasan ympäristön rannikkokuntia.
- Kelirikon määrään vaikuttavat syksyn säätekijät, jotka antavat suunnan kelirikon rankkuuden arviointia varten. Kevään säätekijöillä on kuitenkin kyky muuttaa suuntaa eli pahentaa tai helpottaa kelirikkoa. Luonnollinen seuraus kevään selittävien tekijöiden poisjättämisestä on mallin tarkkuuden heikentyminen.

Runkokelirikon ennustaminen

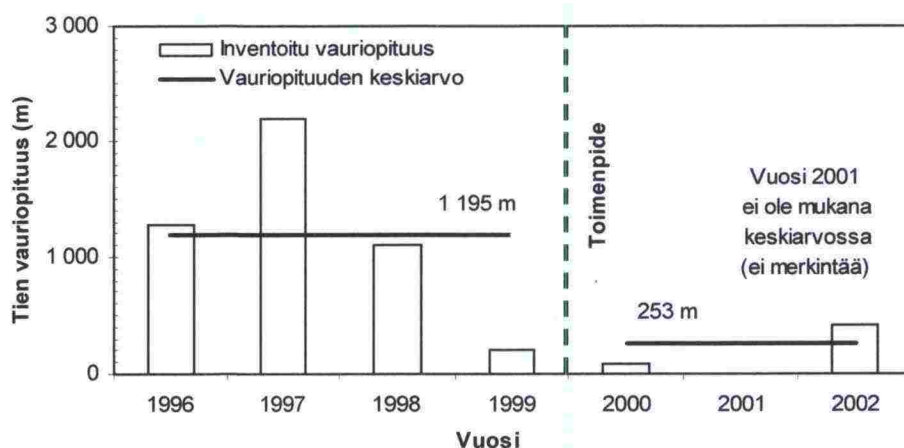


Kuva 21. Mallin 8 toiminta osa-alueilla. Mallissa on mukana pelkästään syksyn selittävät muuttujat.

5 Kunnostustoimenpiteiden vaikutus

5.1 Aineisto ja menetelmä

Kunnostustoimenpiteen vaikutus runkokelirikon esiintymiseen määritetään vertaamalla tien keskimääräistä vuosittaista vauriopituutta ennen ja jälkeen toimenpiteen (kuva 22). Vauriokorjauskohtien tarkempi, tieosiin ja paalulukemiin perustuva tarkastelu ei ole mahdollista johtuen suurpiirteisistä kirjaustavoista. Esimerkiksi tiellä 8693 korjaus on merkitty alkaneeksi tieosan 1 paalulta 318 ja päättyneeksi tieosan 6 loppuun. Tieräkisterin mukaan tiepituus on 25 406 metriä, mutta korjauspituudeksi on merkitty 1 031 metriä. Tarkat korjauspaikat eivät siis ole tiedossa.



Kuva 22. Toimenpiteen vaikutus määritetään vertaamalla tien vuosittaisten runkokelirikkovauriopituuksien keskiarvoa ennen ja jälkeen toimenpiteen.

Toinen analyysia häiritsevä tekijä on se, että runkokelirikkoinventointia ei ole välttämättä tehty kaikilla teillä joka vuosi. Puuttuva inventointitieto voi tämän vuoksi tarkoittaa joko sitä, että vaurioita ei ole ollut tai sitä, että vaurioita ei ole kirjattu. Näiden välillä on oleellinen ero. Keskiarvoissa ovat mukana vain ne vuodet, joilta kirjauksia on tehty. Periaatteessa tämä saattaa pidentää keskiarvorunkokelirikkopituutta. Toisaalta merkitys korjaustoimenpiteen vaikutukseen on vähäinen, koska menettely keskiarvon laskemisessa on sama sekä ennen että jälkeen korjaustoimenpiteen.

Ennen keskiarvon laskemista tien vuosittaiset vauriopituudet kerrottiin tekijällä, joka ottaa huomioon kelirikon rankkuuden vuosittaisen vaihtelun tiepiirissä (taulukko 21). Menettelyllä pyritään tasaamaan vuosittaiset säästä johtuvat erot kelirikkopituuksissa ja saamaan esille pelkän toimenpiteen vaikutus.

Taulukko 21. Vuosittaisten kelirikkopituuksien tasauskertoimet.

Piiri	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Uusimaa	vuotta ei käytetä suurien vaihteluiden takia			122 %	104 %	51 %	410 %	
Turku		123 %	95 %	67 %	80 %	111 %	87 %	287 %
Kaakkois-Suomi		100 %	49 %	117 %	106 %	169 %	91 %	207 %
Häme		343 %	281 %	41 %	106 %	58 %	99 %	409 %
Savo-Karjala		90 %	127 %	90 %	101 %	106 %	70 %	160 %
Keski-Suomi		174 %	104 %	70 %	82 %	88 %	89 %	183 %
Vaasa		208 %	65 %	52 %	121 %	128 %	108 %	190 %
Oulu		68 %	146 %	36 %	212 %	172 %	168 %	239 %
Lappi		83 %	46 %	114 %	163 %	226 %	122 %	113 %

Kunnostustoimenpiteitä on kirjattu 3 795 kappaletta (taulukko 22). Toimenpiteen päiväys on välttämätön, jotta sen vaikutusta voidaan selvittää. Eräissä tiepiireissä toimenpiteitä on tehty kohtuullisen paljon, mutta kaikkia ei voi hyödyntää tarkastelussa, koska niistä puuttuu ajankohta. Yleisesti toimenpidekirjauksia on tehty vasta vuoden 1998 jälkeen, joten korjaustoimenpiteen pitkäaikaisen vaikutuksen selvittäminen ei ole mahdollista.

Taulukko 22. Kirjatut kunnostustoimenpiteet tiepiireittäin ja vuosittain.

Piiri	ei merkintää	Vuosi								Yhteensä
		1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	
Häme	1				36	56	27	69		189
Kaakkois-Suomi					72	106	48	27	36	289
Keski-Suomi	45		3	6	77	99	76	62		368
Lappi				1	65	24	126	237		453
Oulu	224					33	3	1		261
Savo-Karjala		3	3	23	38	60	71	57		255
Turku				47	100	108	39	11	1	306
Uusimaa						431	624	333	29	1417
Vaasa				1	257	106	33	20	19	436
Tyhjä	1									1
Yhteensä	271	3	6	78	645	1023	1047	817	85	3975

Kirjatut toimenpiteet on koodattu uudestaan, sillä eri tiepiireissä sama toimenpidenumero vastaa eri toimenpidettä (taulukko 23). Uudet toimenpidenumerot ja niitä vastaavat selitteet ovat vieläkin osittain päällekkäisiä. Runkokelirikon poistaminen (9) vastannee joko A, B tai C luokan kelirikkokorjausta. Samoin "peruskunnostus-suodatinkangas-pehmeikön korjaus" (12) vastannee kelirikkokorjausta. Toimenpiteen vaikutuksen selvittämisessä käytettiin kunnostustoimenpiteitä 2-10 ja 12 ryhmittelemällä niitä eri tavalla.

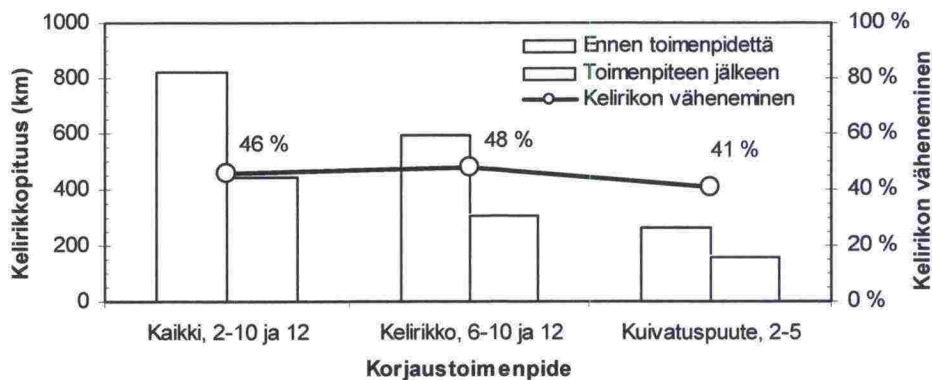
Taulukko 23. Kelirikkokorjausten aineistossa olevat toimenpiteet sekä eri tarkasteluissa käytetyt toimenpiteet.

NO Selite	Tarkasteluryhmä				
	Kaikki	Kelirikko	Kuivatus	A	B C
1 Sorastus					
2 Pituussuuntainen kuivatus	X		X		
3 Rummun korjaus	X		X		
4 Rummun lisäys	X		X		
5 Laskuojan kunnostus	X		X		
6 Raskas kelirikkokorjaus (A)	X	X		X	
7 Keskiraskas kelirikkokorjaus (B)	X	X			X
8 Kevyt kelirikkokorjaus (C)	X	X			
9 Runkokelirikon poistaminen	X	X			
10 Kantavuuden parantaminen	X	X			
11 Päälylystäminen					
12 Peruskunnostus-suodatinkangas-pehmeikön korjaus	X	X			
13 Kevyt kunnostus					
14 Kiveys Höyläys Muotoilu Kastelu Suolaus					
15 Maakivien poisto					
16 Vesakon raivaus					

Tarkasteluryhmä "kaikki" sisältää ne toimenpiteet, joiden voi olettaa jollakin tapaa vaikuttavan kelirikon esiintymiseen. Pelkän kuivatuksen ja toisaalta muiden toimenpiteiden vaikutusta selvitettiin omina ryhminään. Viimeisinä ryhminä tarkasteltiin erikseen varsinaisia A-, B- ja C-luokkiin kuuluvien runkokelirikkokorjausten vaikutuksia kelirikon esiintymiseen.

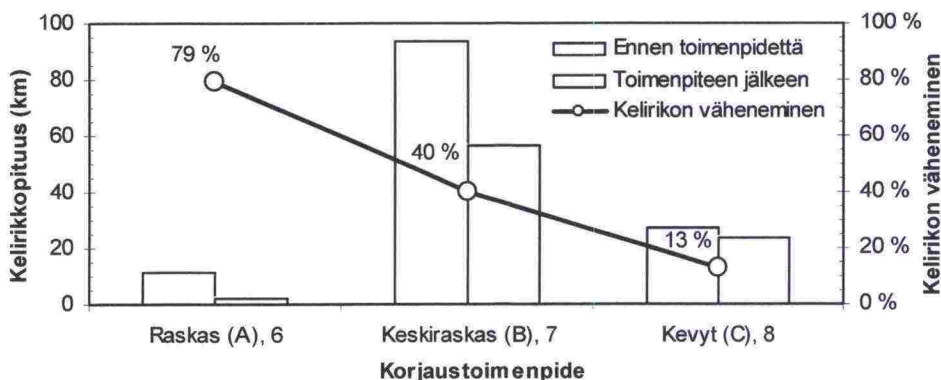
5.2 Kunnostustoimenpiteiden vaikutus runkokelirikkoon

Kaikki korjaustoimenpiteet yhdessä vähensivät runkokelirikkopituutta noin puoleen verrattuna tilanteeseen ennen korjauksia (kuva 23). Varsinaiset kelirikkokorjaukset vähensivät kelirikkopituutta enemmän kuin pelkät kuivatuspuutteiden korjaukset. Kuivatuspuutteiden korjaaminen vähentää kuitenkin selvästi kelirikkoa.



Kuva 23. Kelirikko- ja kuivatuspuutekorjausten vaikutus runkokelirikon esiintymiseen.

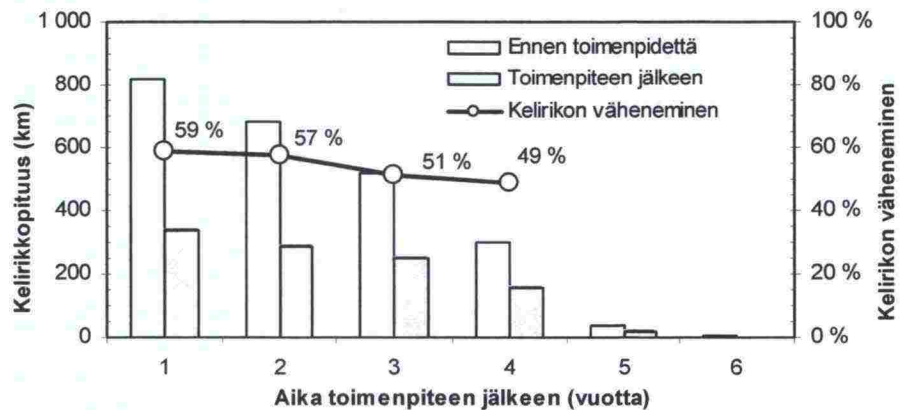
Raskaat kelirikkokorjaukset (A) vähensivät erittäin paljon runkokelirikon esiintymistä (kuva 24). Vauriopituus oli ennen toimenpidettä 11 383 m ja sen jälkeen 2 392 m eli vauriopituus pieneni 79 %. Keskiraskaiden (B) kelirikkokorjausten vaikutus vauriopituuteen oli selvästi vähäisempi kuin A-luokan toimenpiteillä, sillä vauriopituus lyheni noin 40 %. Kevyiden kelirikkokorjausten vaikutus kelirikkopituuteen oli vähäinen, sillä kelirikkopituudet vähenivät vain noin 13 % alkuperäisestä.



Kuva 24. Runkokelirikkokorjaustoimenpiteiden A, B ja C vaikutus runkokelirikon esiintymiseen.

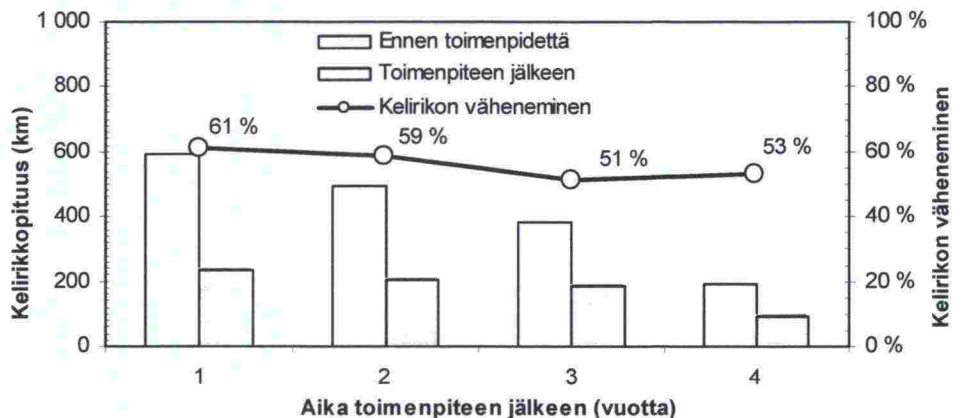
5.3 Kunnostustoimenpiteiden vaikutusaika

Kunnostustoimenpiteet vähensivät 59 % kelirikkopituutta heti ensimmäisenä vuonna kunnostustoimenpiteen jälkeen (kuva 25). Toimenpiteiden vaikutus aleni vuosittain ja oli neljännen vuoden jälkeen enää 49 %. Viidennen ja kuudennen vuoden jälkeen inventoitu kelirikkopituus oli tässä aineistossa niin pieni, ettei sen pohjalta ole perusteltua laskea toimenpiteen vaikutusta. Vertailussa oli mukana ryhmä kaikki kunnostustoimenpiteet, joiden voidaan olettaa vaikuttavan kelirikon esiintymiseen (taulukko 23, ryhmä "kaikki").



Kuva 25. Kaikkien kunnostustoimenpiteiden vaikutus kelirikkopituuteen vuosittain toimenpiteen jälkeen.

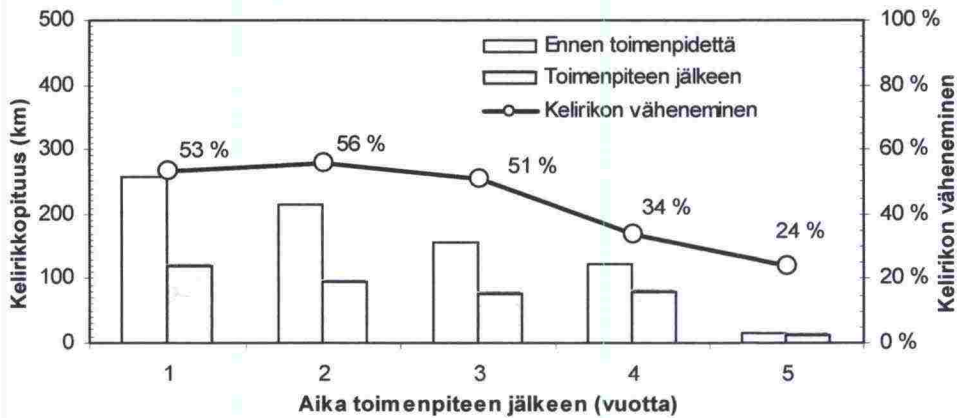
Kelirikon muut korjaustoimenpiteet (taulukko 23, ryhmä "kelirikko"), paitsi kuivatus, vähensivät ensimmäisenä vuonna kelirikkopituutta 61 % ja vielä neljäntenä vuonnakin yli 50 % (kuva 26).



Kuva 26. Kelirikkokorjausten vaikutus kelirikkopituuteen vuosittain toimenpiteen jälkeen.

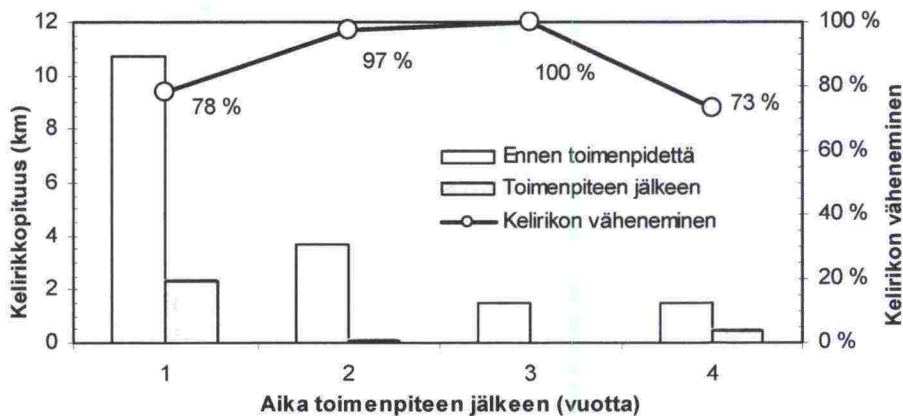
Kuivatuspuutteiden (taulukko 23, ryhmä "kuivatus") korjaaminen lyhensi kelirikkopituutta ensimmäisenä vuotena 53 % (kuva 27). Kuivatuspuutteiden korjauksen vaikutus heikkeni nopeammin kuin kelirikkokorjausten vaikutus ja oli viidentenä vuo-

tena vain 24 %. Suoraviivaisen ennusteen mukaan kuivatuspuutteen korjaaminen ei vaikuta enää lainkaan 8 vuoden kuluttua toimenpiteestä.



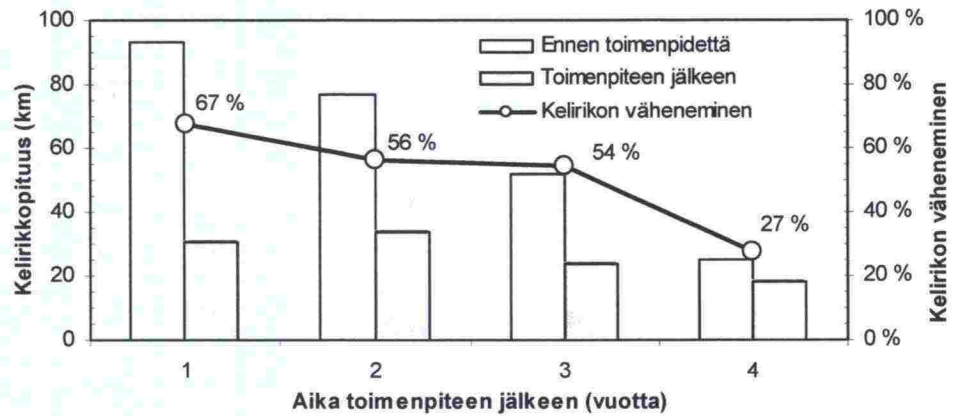
Kuva 27. Kuivatuspuutekorjausten vaikutus kelirikkopituuteen vuosittain toimenpiteen jälkeen.

Raskaita runkokelirikkokorjauksia (A) ja vaurioita oli inventoitu vain 16 tiellä, joten aineistosta saatu tulos ei välttämättä ole tilastollisesti pätevä. Kuitenkin tässä aineistossa raskas kelirikkokorjaus lyhensi runkokelirikkopituutta eniten (kuva 28). Kelirikkopituus lyheni tyypillisesti enemmän kuin 75 %. Ajalla ei näyttäisi olevan vaikutusta kelirikkokorjauksen toimintaan.



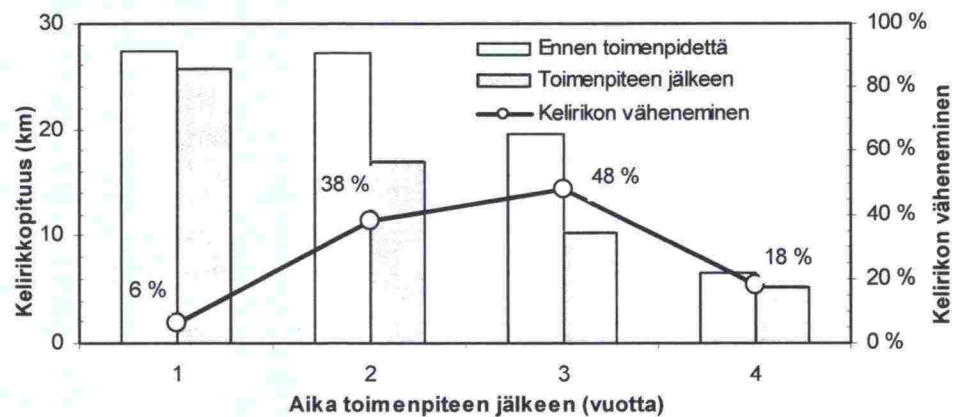
Kuva 28. Raskaan kelirikkokorjauksen (A) vaikutus kelirikkopituuteen vuosittain toimenpiteen jälkeen.

Keskiraskaiden kelirikkokorjausten (B) vaikutus vähenee vuosien kuluessa (kuva 29). Vuoden kuluttua toimenpiteestä vauriopituus lyheni 67 prosenttia verrattuna tilanteeseen ennen toimenpidettä ja neljäntenä vuonna vauriopituus lyheni vain 27 %. Mikäli vähenevä suuntaus olisi suoraviivainen, keskiraskas kelirikkokorjaus ei vaikuttaisi enää lainkaan seitsemän vuoden kuluttua toimenpiteestä.



Kuva 29. Keskiraskaan kelirikkokorjauksen (B) vaikutus kelirikkopituuteen vuosittain toimenpiteen jälkeen.

Kevyen runkokelirikkokorjauksen (C) vaikutus kasvoi 2-3 vuoden aikana korjauksesta, jonka jälkeen vaikutus väheni. Yleisesti kevyen runkokelirikkokorjauksen vaikutus oli vähäisempi kuin tehokkaammilla korjaustavoilla (kuva 30, vrt. kuvat 28 ja 29). Aineistossa C-luokan toimenpiteen ja vauriomäärien välillä oli usein (19/48) käänteinen suhde ennakoituun, sillä runkokelirikon pituus tietyillä teillä kasvoi kunnostustoimenpiteen jälkeen. Ajan merkitystä ei kyetä ennustamaan, mutta kevyen runkokelirikkokorjauksen vaikutus oli yleensä heikohko.



Kuva 30. Kevyen kelirikkokorjauksen (C) vaikutus kelirikkopituuteen vuosittain toimenpiteen jälkeen.

6 Painorajoitusten asettaminen hoitourakoinnin näkökulmasta

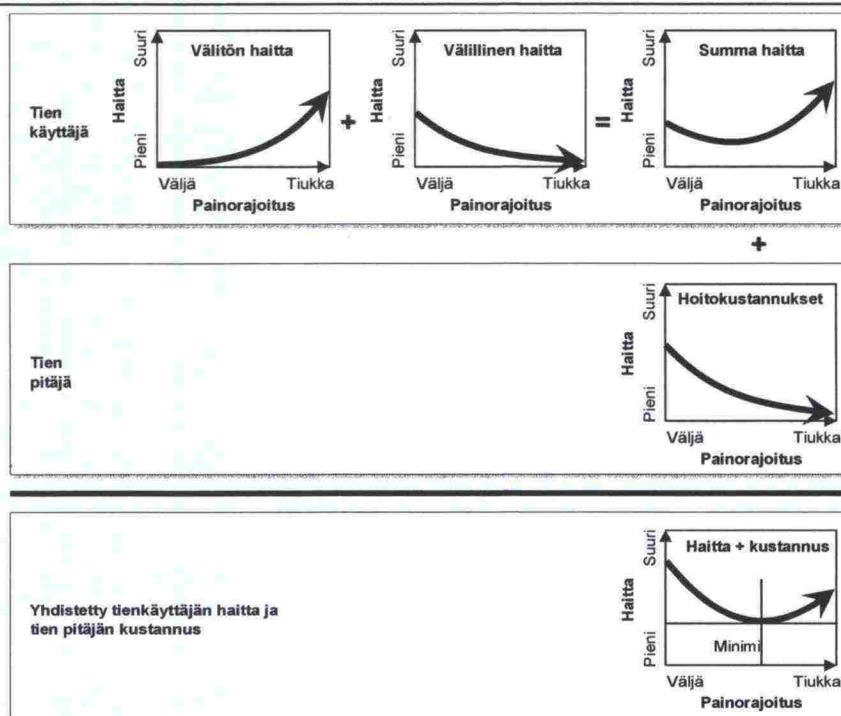
6.1 Lähtökohdat

Runkokelirikkoa esiintyy väistämättä Suomessa, koska osa tiestöstä on jouduttu rakentamaan resurssien sallimissa puitteissa alhaisin standardein tai niissä ei ole asiallisia rakennekerroksia lainkaan. Runkokelirikkoa aiheuttavaa, riittävän syvälle tunkeutuvaa routaa esiintyy koko Suomessa joka vuosi. Painorajoituksia tarvitaan pitämään tiet liikennöitävässä kunnossa ja estämään lisävaurioiden muodostuminen, sillä runkokelirikosta kärsivien teiden täydellinen korjaaminen olisi erittäin kallista.

Painorajoituksista aiheutuu haittaa tien käyttäjille, erityisesti raskaille kuljetuksille. Runkokelirikon laajuus ja laatu vaihtelevat vuosittain sääolosuhteiden vaihtelun mukaan. Liikenteelle aiheutuvaa haittaa voidaan minimoida ennustamalla kevään rankkuus ja asettamalla painorajoituksia ennusteen mukaan vain tarpeellinen määrä. Tähän tavoitteeseen pyritään kaksivaiheisen ennusteprosessin avulla. Alueellisten sää-tietojen perustella määritetään kevään rankkuus ja hoitourakka-alueen runkokelirikoinventointitietojen perusteella määritetään tarvittava painorajoituspituus.

6.2 Painorajoitusten vaikutukset ja niiden arviointi

Painorajoitusten laajuudella on vaikutuksia sekä tien käyttäjän että tienpitäjän kannalta. Vaikutukset painorajoitusten tiukentuessa ovat osin erisuuntaisia eri kohderyhmissä. Yleisesti tienpitäjän kannalta painorajoituksilla voidaan säästää hoito (hätkäkorjaus) ja kunnostuskustannuksissa. Osa tienkäyttäjistä hyötyy tiukoista painorajoituksista, koska tie säilyy ajokelpoisena, matka-aika pysyy lyhyenä ja ajoneuvo raskautuu vähemmän kuin vaurioituneella tiellä. Toinen osa tienkäyttäjistä kokee painorajoituksen haittana, koska se pienentää raskaiden ajoneuvojen hyötykuormaa tai estää kokonaan muut raskaat kuin elintärkeät kuljetukset. Painorajoitusten yhtäaikaisten ja erisuuntaisten osavaikutusten kokonaisvaikutusta voidaan arvioida laskemalla haittojen ja kustannusten summa. Periaatteessa optimi painorajoitustaso on haittojen ja kustannusten minimi (kuva 31).



Kuva 31. Optimipainorajoitustason määrittämisen periaate.

Tien käyttäjän välitön haitta kasvaa painorajoituksen tiukentuessa. Painorajoituksista on välitöntä haittaa lähinnä raskaalle liikenteelle. Väljät rajoitukset sallivat raskaiden ajoneuvojen osakuormilla tai tyhjänä ajon. Rajoituksen tiukentuessa raskaat kuljetukset estyvät. Välitön haitta kasvaa sitä nopeammin, mitä tiukemmaksi rajoitus muuttuu.

Tien käyttäjän välillinen, runkokelirikkovaurioista johtuva haitta vähenee rajoituksen tiukentuessa. Liikkuminen hyväkuntoisella tiellä vähentää ajoneuvon tekniikkaan kohdistuvia rasituksia, vähentää matka-aikaa ja pienentää onnettomuusriskiä. Välillinen haitta vaikuttaa sallitun raskaan liikenteen lisäksi myös kaikkeen henkilöautoliikenteeseen. Välillisten haittojen väheneminen hidastuu siirryttäessä väljistä painorajoituksesta tiukempaan.

Tien käyttäjän summahaitta on välittömien ja välillisten haittojen yhteisvaikutus. Tien käyttäjän kannalta on löydettävissä sellainen painorajoitusten taso, joka kokonaisuutena haittaa vähiten käyttäjiä.

Tien pitäjän hoitokustannukset tarkoittavat runkokelirikkovaurioiden akuutteja hätäkorjauksia, joilla turvataan tien liikennöitävyys. Painorajoituksella rajoitetaan raskaan liikenteen aiheuttamaa tien vaurioitumista, kunnostustarvetta ja siitä muodostuvia kustannuksia. Hoitokustannusten lasku hidastuu siirryttäessä väljistä painorajoituksesta tiukempaan.

Laskemalla tienkäyttäjän haittojen ja tienpitäjän kustannusten summa eri painorajoituksilla, voidaan määrittää kokonaishaittojen ja -kustannusten minimi. Optimi painorajoitus on kustannusten ja haittojen minimikohdassa. Vaativin tehtävä on arvottaa

haitat keskenään vertailukelpoisiksi rahamääriksi sekä määrittää painorajoituksen suuruuden vaikutus hoitokustannuksiin.

6.3 Alueen sallittu painorajoitusten laajuus

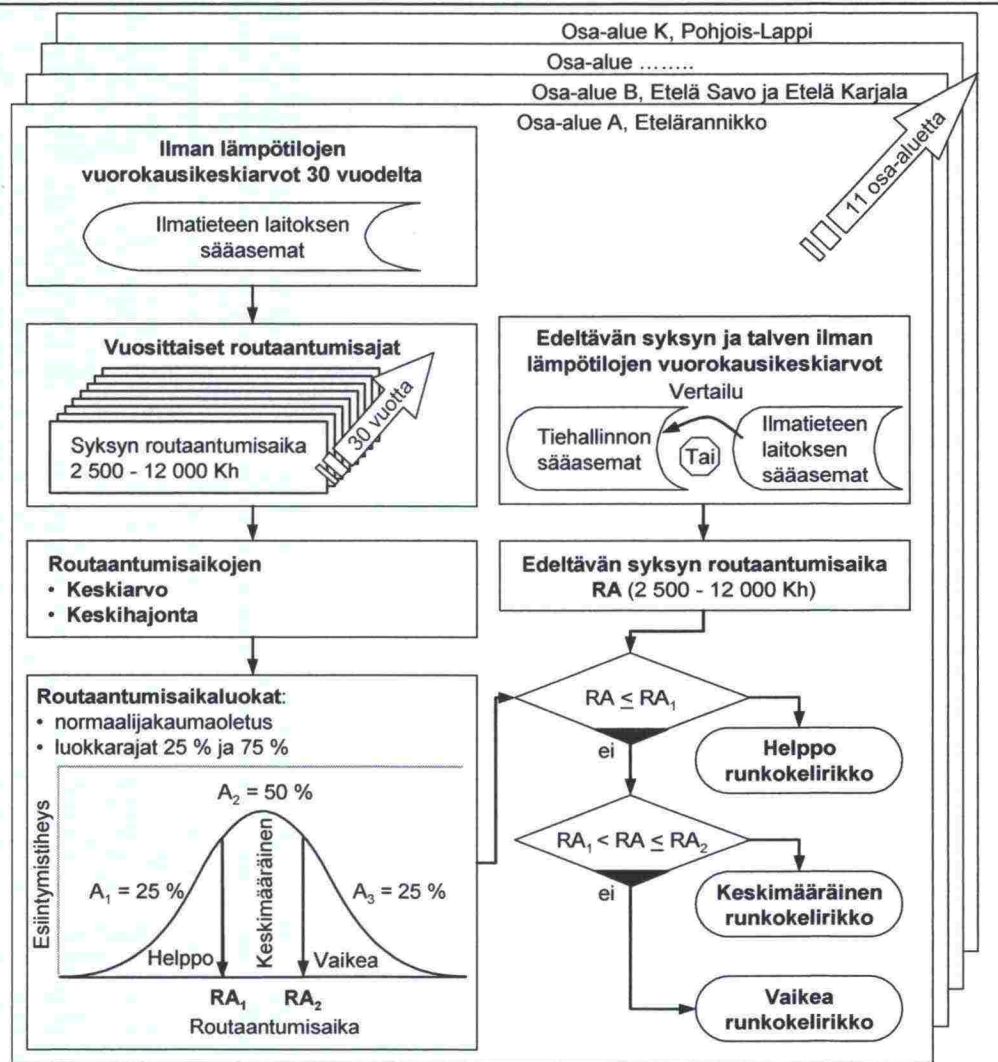
6.31 Periaatteita

Sorateiden suhteellinen runkokelirikkopituus vaihtelee selvästi eri piirien ja alueiden välillä. Tämän takia painorajoitusten määrä pitää sovittaa alueellisten kelirikkomäärien mukaan. Siellä, missä runkokelirikkopituus on suuri, joudutaan myös painorajoituksia käyttämään runsaasti. Painorajoitusten liikenteelle aiheuttamaa haittaa voidaan tasapainottaa eri alueiden välillä suuntaamalla kelirikkoteiden kunnostuksen painopiste sinne, missä kelirikkopituus on suurin.

Painorajoitusten laajuuden hoitourakkaa varten voi määrittää joko Tiehallinto tai urakoitsija itse. Mikäli sen tekee Tiehallinto, määritetään Tiehallinnossa syksyennusteen perustella kevään runkokelirikon rankkuus ja asetetaan painorajoitusmäärät urakoitsijaa varten. Jos painorajoitusten laajuuden määrää urakoitsija, hän tekee sen myös syksyennusteen perusteella ja Tiehallinto tarkastaa laajuuden joko kokovuoden ennusteen tai suoraan kevään inventointitietojen avulla. Riski kevään sääolosuhteiden vaihtelun vaikutuksesta runkokelirikon esiintymiseen on tässä tapauksessa urakoitsijalla.

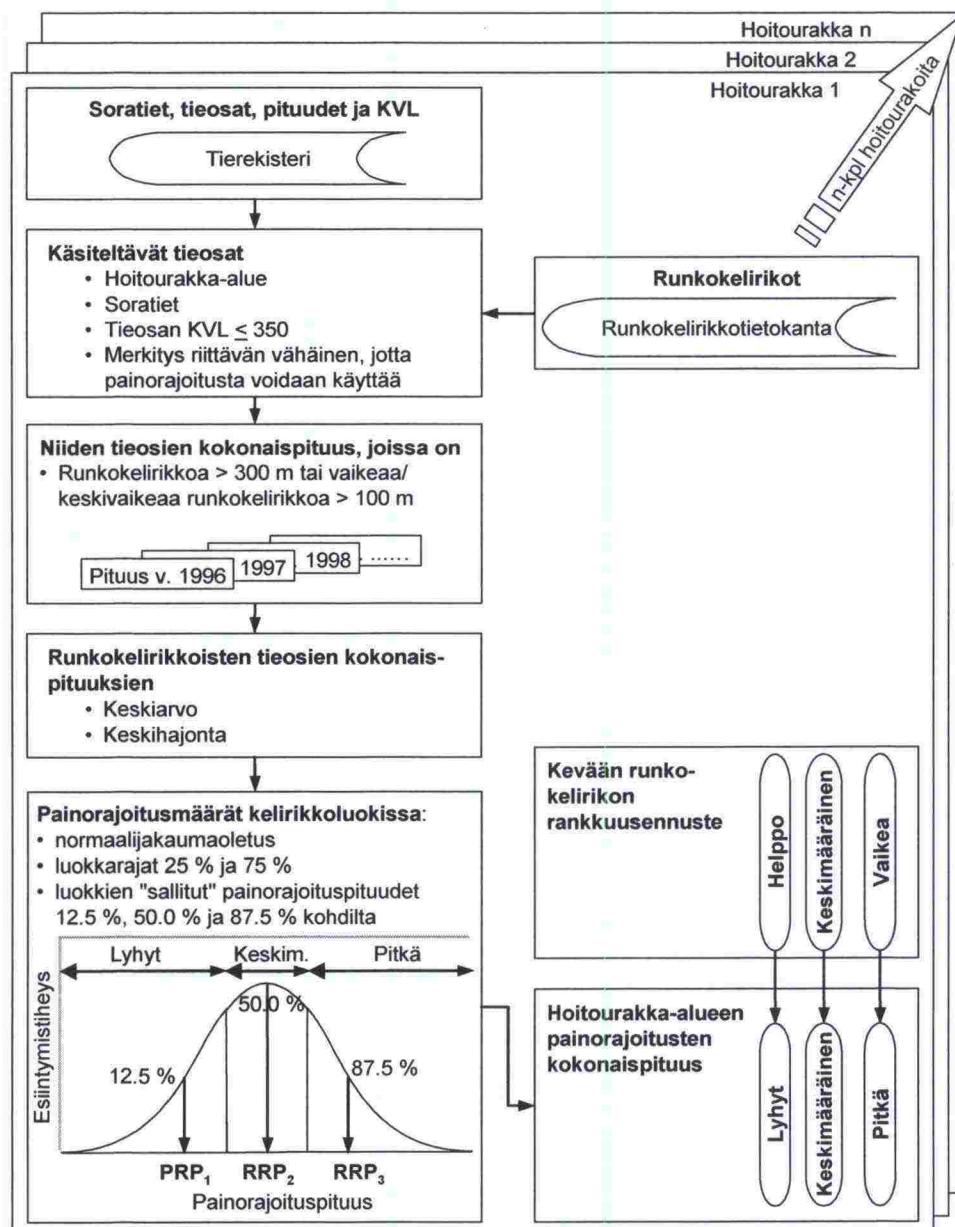
Kevään painorajoitustarpeen ennakkointi perustuu hoitourakka-alueen vuosittaisiin runkokelirikkopituuksiin ja niiden vaihteluun. Runkokelirikkoennusteen avulla ei voida suoraan laskea yksittäisen tien kelirikkopituutta eikä myöskään osa-aluetta pienemmän alueen "täsmällistä" kelirikkopituutta. Sen sijaan ennusteen avulla voidaan etukäteen arvioida, kuinka vaikea tulevan kevään runkokelirikko tulee olemaan, eli tuleeko siitä lievä, keskimääräinen vai vaikea. Tämä pienentää kevään yllätyksellisuuden aiheuttamaa riskiä. Ennusteen perusteella voidaan hoitourakka-alueen painorajoitukset asettaa lieviksi, keskimääräisiksi tai tiukoiksi.

Ennuste on kaksivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa määritellään pitkän ajan routaantumisaikojen perusteella helppo, keskimääräinen ja vaikea runkokelirikkokevät. Ennustettavan kevään rankkuus määräytyy vertaamalla edeltävän syksyn routaantumisaikaa pitkän ajan routaantumisaikojen jakaumaan (kuva 32).



Kuva 32. Kevään kelirikon rankkuuden määrittäminen.

Toisessa vaiheessa määritetään hoitourakka-alueen vuosittaisten runkokelirikkoinventointeihin perustuvien painorajoituspituuksien jakauma ja jaetaan pituudet jakauman perusteella luokkiin lyhyt, keskimääräinen ja pitkä sekä lasketaan luokkien painorajoituspituudet (kuva 33). Tulevan kevään runkokelirikon rankkuusennusteen perusteella asetetaan painorajoitukset joko lyhyiksi, keskimääräisiksi tai pitkeiksi.



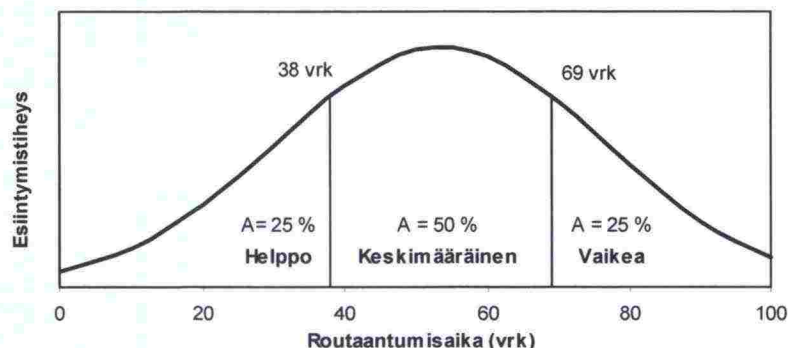
Kuva 33. Hoitourakka-alueen painorajoitusten kokonaispituuden määrittäminen.

6.32 Kevään kelirikon rankkuuden luokittelu ja ennustaminen

Runkokelirikkokevää jaetaan osa-alueittain luokkiin lievä, keskimääräinen ja vaikea käyttämällä syksyn kelirikkoennustetta (kaava 8). Tietyllä osa-alueella kaavan 8 ainut muuttuva tekijä on routaantumisaika, joten luokittelu tehdään routaantumisaika-tilastojen avulla. Luokituksen peruste on eri vuosina esiintyneiden routaantumisaikojen esiintymistiheys.

Routaantumisajat ovat likimäärin normaalijakautuneet samoin kuin useimmat muutkin säämuuttujat. Normaalijakaumaoletuksen ja 30 vuoden tilaston /Belt ym., 1999/ perusteella voidaan helposti määrittää routaantumisaikojen luokkarajat. Rajoina käytetään 25 % ja 75 % prosenttipisteitä, jolloin neljän vuoden aikana esiintyy keskimäärin yksi vaikea, kaksi keskimääräistä ja yksi helppo runkokelirikkokevät. Ku-

vassa 34 on esitetty Keski-Suomen otosalueen routaantumisaikojen jakauma. Keski-Suomen osa-alueella runkokelirikon ennustetaan olevan helppo, kun routaantumisaika on lyhyempi kuin 38 vuorokautta ja vaikea, kun routaantumisaika on pitempi kuin 69 vuorokautta.



Kuva 34. Runkokelirikon rankkuuden jakaminen luokkiin routaantumisaajan esiintymistiheyden perusteella Keski-Suomen otosalueella.

Tiettyä prosenttipistettä, tässä tapauksessa 25 % tai 75 % vastaava routaantumisaika määräytyy tilastomuuttujan keskiarvon ja keskihajonnan perusteella. Laskelmissa on käytetty 30 vuoden tilastoa Etelä-rannikon, Pohjois-Savon, Keski-Suomen sekä Etelä- ja Keski-Pohjanmaan osalta (taulukko 24). Muiden osa-alueiden routaantumisaikaluokat on laskettu ympäröivien osa-alueiden perusteella taulukon 19 mukaisesti. Lyhyen aikavälin ja pitkän aikavälin aineistoista lasketut routaantumisaajan keskiarvot vastaavat varsin hyvin toisiaan. Sen sijaan keskihajonnat ovat pitkän aikavälin aineistossa selvästi suuremmat. Yleisesti routaantumisaika lyhenee, kun siirrytään etelästä pohjoiseen ja rannikolta sisämaahan päin.

Taulukko 24. Osa-alueiden routaantumisaikarajat kevään runkokelirikon rankkuuden ennustamista varten.

Tunnus Osa-alue	Routaantumisaika (vuorokautta)					
	1996 - 2002		30 vuoden tilasto		Ala- kvartiili 25 %	Ylä- kvartiili 75 %
A Etelärannikko *	81.7	20.7	75.2	28.4	56	94
B Etelä-Savo ja Etelä-Karjala	62.1	13.8	58.5	22.5	43	74
C Häme	66.0	14.4	64.6	26.6	47	83
D Pohjois-Savo *	50.3	16.5	46.9	16.2	36	58
E Pohjois-Karjala	50.3	16.5	46.9	16.2	36	58
F Keski-Suomi *	54.3	14.8	53.5	22.9	38	69
G Etelä- ja Keski-Pohjanmaa *	62.0	16.5	65.3	28.5	46	85
H Pohjois-Pohjanmaa ja Perämeren kunnat	49.9	9.4	52.4	19.9	39	66
I Kainuu ja Koillismaa	44.1	10.7	43.3	13.7	34	53
J Etelä-Lappi *	37.9	9.0	39.6	11.2	32	47
K Pohjois-Lappi	37.9	9.0	39.6	11.2	32	47

* Tähdellä merkittyjen osa-alueiden routaantumisaajat perustuvat 30 vuoden tilastoon. Muiden osa-alueiden routaantumisaajat on laskettu ympäröivien osa-alueiden routaantumisaikojen keskiarvona. Routaantumisaikojen määrittely tulee tehdä kaikille osa-alueille alueella olevan sääaseman mittaustietojen perusteella.

Tietyllä hoitourakka-alueella käytetään sen osa-alueen A-K luokitusrajoja, johon hoitourakka-alue kuuluu.

Kevään kelirikon rankkuusennustetta varten jokaisella osa-alueella lasketaan vuosittain ilman lämpötilojen vuorokausikeskiarvojen perusteella routaantumisaika vuorokausina, jona pakkasmäärä kasvaa 2 500 Kelvin tunnista 12 000 Kelvin tuntiin.

Lämpötilatiedot voivat olla peräisin joko Ilmatieteen laitoksen sääasemalta tai Tiehallinnon tiesääasemilta. Tiesääasemia käytettäessä mittaustulosten yhteensopivuus Ilmatieteen laitoksen mittauksiin kannattaa varmistaa vertaamalla.

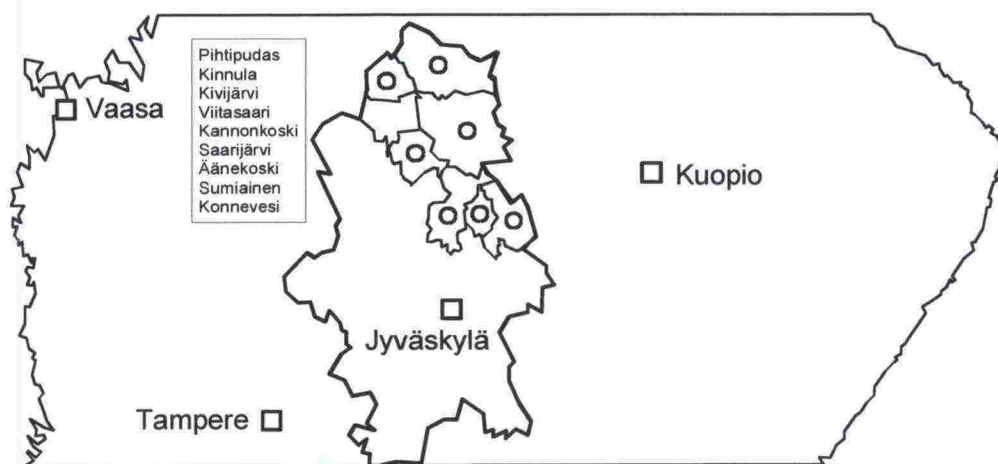
Vertaamalla laskettua routaantumisaikaa taulukon 24 luokkarajoihin saadaan kevään kelirikon rankkuusennuste. Esimerkki: hoitourakka-alue sijaitsee Etelä-Lapin alueella. Tiettyä vuonna routaantumisajaksi on laskettu 35 vuorokautta, joka on suurempi kuin alakvartiili 32 ja pienempi kuin yläkvartiili 47 vuorokautta. Tällöin kevään kelirikon rankkuus tulee todennäköisesti olemaan keskimääräinen.

6.33 Painorajoitusmäärät eri kelirikon vaikeusluokissa

Sen jälkeen, kun kevään kelirikon rankkuus on ennustettu, tulee hoitourakka-alueen painorajoitusten yhteispituus asettaa vastaamaan hoitourakka-alueen olosuhteita. Painorajoitusmäärä sisältää periaatteessa sekä painorajoitetun soratiepituuden että painorajoitusten suuruuden. Taulukon 7 perusteella voidaan päätellä, että mikäli kelirikkokevät on vaikea, niin sekä kelirikkopituus että kelirikon vaikeus kasvavat. Eri luokkia vastaavien painorajoitusten suuruutta selvitetään käynnissä olevassa erillisessä tutkimuksessa. Periaatteessa painorajoitusten suuruus pitäisi määrittää mekaanistisen tarkastelun perusteella.

Runkokelirikon takia painorajoitusta vaativien teiden pituus määritetään erikseen kullekin hoitourakka-alueelle. Varsinaista runkokelirikkotietokannassa olevaa painorajoitustaulukkoa ei voida käyttää, koska sitä on päivitetty ainoastaan satunnaisesti. Tästä syystä painorajoitusten pituus määritetään vuosittaisten runkokelirikkoinventointien avulla.

Painorajoitusmääriä arvioidaan tässä esimerkkialueen avulla. Alue on Keski-Suomessa ja siihen kuuluvat Kannonkoski, Kinnula, Kivijärvi, Konnevesi, Pihtipudas, Saarijärvi, Sumiainen, Viitasaari ja Äänekoski (kuva 35). Kuntarajojen mukaan rajatulla alueella on 138 soratien tieosaa. Viiden tieosan KVL ylittää 350, jotka poistetaan tarkastelusta. Tierekisterin perusteella esimerkkialueen sorateiden kokonaispituus, joilla voidaan liikennemäärän puolesta käyttää painorajoitusta, on 657 km.



Kuva 35. Laskentaesimerkin hoitourakka-alue.

Yksi pitkä runkokelirikko-osuus saattaa vaatia koko tien painorajoittamista tai voidaan selvittää ainoastaan tietyn tieosan painorajoituksella riippuen tien yhteyksistä muihin teihin. Todellisilla urakka-alueilla ratkaistaan paikallisen tiedon perusteella se, kuinka moneen tieosaan tietä painorajoitus kohdistuu. Tässä esimerkissä painorajoitus määrätään tieosittain. Mikäli runkokelirikkoa esiintyy yli 300 m/tieosa tai vaikeaa/keskivaikeaa runkokelirikkoa 100m/tieosa, niin painorajoitus kohdistuu kyseiselle tieosalle.

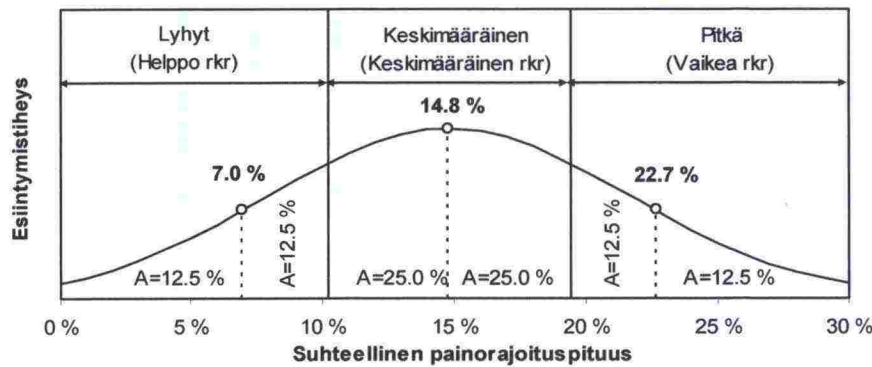
Vuosittaiset runkokelirikkopituuksien summat kaikissa kelirikkoluokissa sekä kelirikkoluokissa 1 ja 2 (vaikea ja keskivaikea) vuodesta 1996 alkaen lasketaan tieosittain runkokelirikkotietokannan tietojen avulla. Tuloksesta poimitaan ne tieosat, jotka ylittävät edellä mainitut runkokelirikon pituusehdot ja lasketaan vuosittaiset runkokelirikosta kärsivien tieosien pituudet yhteen. Laskemalla runkokelirikkoisten tieosien ja soratiepituuden osamäärä saadaan vuosittaiset suhteelliset painorajoituspituudet.

Kevät 2002 mukaan lukien inventoituja vuosia on seitsemän ja määrä kasvaa vuosittain. Alkuvaiheessa vuosien 1996 ja 1997 tulokset joudutaan pitämään mukana aineiston koon kasvattamiseksi, vaikka ne eräillä alueilla ovat tavanomaisesta poikkeavia. Tarkasteltujen vuosien suhteellisista painorajoituspituuksista lasketaan urakka-alueittain keskiarvo ja keskihajonta (taulukko 25).

Taulukko 25. Suhteelliset painorajoituspituudet esimerkin hoitourakka-alueella.

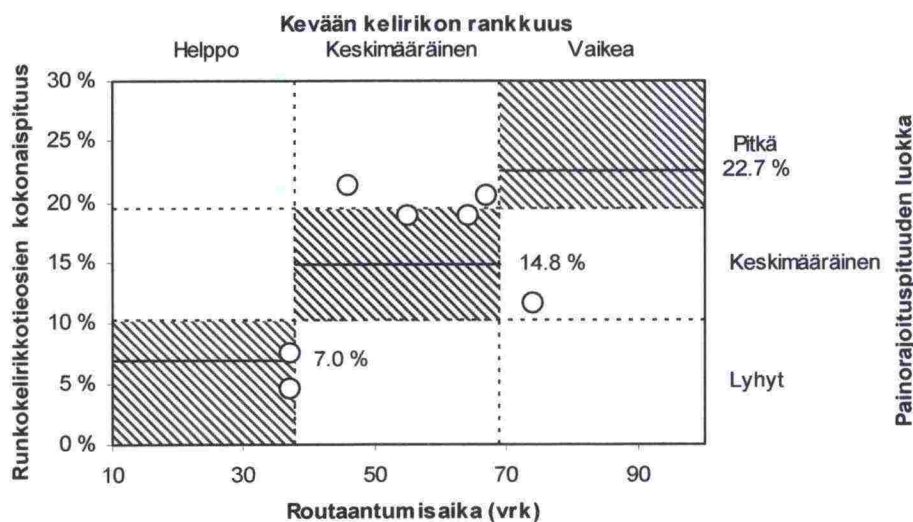
Vuosi	Suhteellinen painorajoituspituus
1996	7.52 %
1997	4.57 %
1998	18.92 %
1999	20.59 %
2000	11.73 %
2001	18.93 %
2002	21.43 %
Keskiarvo	14.81 %
Keskihajonta	6.81 %
Prosenttipiste	Arvo
12.5 %	7.0 %
50.0 %	14.8 %
87.5 %	22.7 %

Keskiarvoa, keskihajontaa, normaalijakaumaoletusta ja taulukkolaskentaohjelmaa käyttäen määritetään suhteellisten painorajoituspituuksien 12.5, 50.0 ja 87.5 prosenttipisteen arvot. Yleisesti käytetyssä taulukkolaskentaohjelmassa prosenttipisteen arvo määritetään funktiolla NORMINV, jonka parametreiksi annetaan järjestyksessä prosenttipiste, keskiarvo ja keskihajonta. Prosenttipisteen 12.5 arvo vastaa helpon, 50.0 keskimääräisen ja 87.5 vaikean kevään suhteellista painorajoituspituutta. Kevään runkokelirikon tietyn rankkuusluokan painorajoituspituus valitaan luokan keskikohdalta (kuva 36).



Kuva 36. Painorajoituspituuden jakaminen luokkiin esiintymistiheyden perusteella esimerkin hoitourakka-alueella. "Sallittu" painorajoituspituus on valittu luokan keskikohdalta.

Vuosina 1996 - 2002 esimerkin hoitourakka-alueella olisi routaantumisaajan perusteella ollut kahtena vuonna lyhyt painorajoituspituus, neljänä keskimääräinen ja yhtenä pitkä (kuva 37). Tavoite on, että jos kevään ennuste on helppo, sijoittuisi runkokelirikkoisten tieosien kokonaispituus luokkaan lyhyt. Vastaavasti ennuste keskimääräinen vastaisi keskimääräistä ja vaikea pitkää painorajoituspituusluokkaa (kuvasa rasteroidut ruudut). Ennusteluonne huomioon ottaen runkokelirikkoisten tieosien vuosittainen kokonaispituus ja routaantumisaajan perusteella tehtävä ennuste sopivat kohtalaisen hyvin yhteen. Mikäli halutaan kasvattaa varmuutta siitä, että ennusteen sallima painorajoituspituus kattaa painorajoitustarpeen, voidaan sallittu painorajoituspituus valita kunkin luokan ylärajalta.



Kuva 37. Routaantumisaajan perusteella määrätyn painorajoituspituuden ja runkokelirikkovaurioiden perusteella määrätyn painorajoituspituuden yhteensovitus esimerkkialueella.

Metrimääräiset painorajoituspituudet saadaan kertomalla suhteelliset arvot tarkasteltavalla tiepituudella. Esimerkin painorajoituspituus vaihtelee merkittävästi kevään

rankkuudesta riippuen: helppona keväänä painorajoituspituus on 46 km, keskimääräisenä 97 km ja vaikeana 149 km.

6.34 Painorajoitusten asettamis- ja poistamisajankohta

Painorajoituksen asettamista oikealla hetkellä pidetään tärkeänä, sillä tierakenne alkaa heiketä jo sulamisen alkuvaiheessa. Samalla oikein ennakoitu sulaminen antaa mahdollisuuden tiedottaa etukäteen yleisölle tulevista painorajoituksista.

Minnesotassa käytettävä sulamisajan alun ennustemenetelmä perustuu ilman lämpötilan vuorokauden minimin ja maksimin seuraamiseen sekä kolmen päivän ennusteeseen (kaavat 1, 2, 3 ja 4). Tässä esimerkissä käytetään samaa laskumenetelmää, jota on tarkistettu vertailulämpötilan osalta. Lämpötilatiedot on otettu Temmeksen instrumentoidun koetien mittauksista, jossa lämpötilat mitataan ilmasta ja tierakenteesta. Mittausanturit ovat PT-100 tyyppiä ja niitä on sijoitettu päällysteen ylä- ja alapintaan, kantavan kerroksen pintaan ja siitä alaspäin 3 m syvyyteen noin 30 cm välein. Mittaustulos saadaan jokaisesta anturista 15 minuutin välein ympäri vuorokauden. Kohteessa on 110 mm paksut sidotut kerrokset. Päällysrakenteen paksuus on noin 1.9 m. Kohde on aurinkoisella paikalla.

Vertailulämpötila (T_{ref}) ottaa huomioon auringon säteilyn vaikutuksen, jonka vuoksi tien pinta (ja rakenne) lämpenevät keväällä nopeammin kuin ilman lämpötila. Lämpötilaero on sitä suurempi, mitä suurempi auringon paistokulma on. Koska Suomi sijaitsee pohjoisempana kuin Minnesota, Suomessa vertailulämpötila (T_{refSF}) on pienempi kuin Minnesotassa (T_{ref}). Suomen vertailulämpötila laskee 0.018°C vuorokaudessa eli 0.126°C viikossa. Vastaava Minnesotan lämpötila laskee 0.5° viikossa (taulukko 26). Tarkimmin vertailulämpötilan voi laskea kullekin vuorokaudelle erikseen kertomalla päivän järjestysnumeron luvulla 0.018°C . Kumulatiivisen lämpösumman laskeminen alkaa helmikuun ensimmäinen päivä ja päättyy, kun se saavuttaa arvon 14°Cvrk .

Taulukko 26. Kumulatiivisen lämpösumman (CTI) laskemisessa tarvittavat vertailulämpötilat Minnesotassa ja Suomessa (Temmeksen koetie).

Päiväys		Minnesota, T_{ref} ($^{\circ}\text{C}$)	Suomi, T_{refSF} ($^{\circ}\text{C}$)
tammikuu 01	- tammikuu 01	0.0	0.000
helmikuu 01	- helmikuu 07	-1.5	-0.612
helmikuu 08	- helmikuu 14	-2.0	-0.738
helmikuu 15	- helmikuu 21	-2.5	-0.864
helmikuu 22	- helmikuu 28	-3.0	-0.990
maaliskuu 01	- maaliskuu 07	-3.5	-1.116
maaliskuu 08	- maaliskuu 14	-4.0	-1.242
maaliskuu 15	- maaliskuu 21	-4.5	-1.368
maaliskuu 22	- maaliskuu 28	-5.0	-1.494
maaliskuu 29	- huhtikuu 04	-5.5	-1.620
huhtikuu 05	- huhtikuu 11	-6.0	-1.746
huhtikuu 12	- huhtikuu 18	-6.5	-1.872
huhtikuu 19	- huhtikuu 25	-7.0	-1.998
huhtikuu 26	- toukokuu 02	-7.5	-2.124
toukokuu 03	- toukokuu 09	-8.0	-2.250
toukokuu 10	- toukokuu 16	-8.5	-2.376
toukokuu 17	- toukokuu 23	-9.0	-2.502
toukokuu 24	- toukokuu 30	-9.5	-2.628
kesäkuu 01	- joulukuu 01	0.0	0.000

Kantavan kerroksen sulamisen alkuhetki eli lämpötilan nousu keväällä pysyvästi 0°C yläpuolelle voidaan määritellä varsin luotettavasti CTI:n avulla (taulukko 27). Tarkastelut tehdään vuorokauden tarkkuudella, joten CTI voi kasvaa useita asteita vuorokaudessa, eikä se yleensä saa täsmälleen 14°Cvrk arvoa, vaan hiukan sen ali tai yli. Esimerkiksi vuonna 1999 CTI oli kantavan kerroksen pinnan sulamishetkellä 12.6°Cvrk ja seuraavan vuorokauden lopussa jo 17.9°Cvrk. Koska raja (14°Cvrk) täyttyi vasta seuraavan vuorokauden aikana, on taulukkoon kirjattu 1 vuorokauden virhe. Ainut oleellisesti poikkeava kevät oli 2003, jolloin todellinen kantavan kerroksen sulaminen alkoi vasta 9 vuorokautta laskettua myöhemmin. Vuonna 2003 ilman kumulatiivinen lämpösumma kohosi pysyvästi 0°C yläpuolelle tavanomaista aiemmin eli 66. vuorokausi vuoden alusta. Tämän jälkeen lämpötila kuitenkin kävi useita kertoja pitkäähkön ajan 0°C alapuolella.

Taulukko 27. Vuorokauden järjestysnumero, jolloin lämpötila on noussut pysyvästi yli 0°C Temmeksen koetiellä, kumulatiivinen sulamisindeksi kantavan kerroksen sulaessa ja kantavan kerroksen sulamisajan määrittelyn virhe.

Vuosi	Vuorokausi, jolloin lämpötila nousi pysyvästi yli 0°C		CTI, kun kantavan pinta alkaa sulaa (°Cvrk)		Ero kantavan kerroksen sulamishetken alun määrittelyssä (vrk)*	
	Ilma	Kantavan kerroksen pinta Tien keskellä Tien reunassa	Tien keskellä	Tien reunassa	Tien keskellä	Tien reunassa
1999	86	86 86	12.6	12.6	-1	-1
2000	94	89 89	10.1	10.1	-1	-1
2001	88	90 91	9.1	14.9	-1	0
2002	76	77 78	6.9	14.0	-1	0
2003	66	81 81	33.8	33.8	+9	+9

* Virhe on negatiivinen, kun todellinen sulaminen tapahtuu ennen CTI perusteella määritettyä hetkeä

Mittaukset on tehty asfalttipäällysteiseltä tieltä. Alempiluokkaiset soratiet alkavat todennäköisesti sulaa jonkin verran myöhemmin kuin ylempiluokkaiset asfalttipäällysteiset tiet. Mittaustietoa tästä ei ole käytettävissä. Jokainen tiellä liikkuja kuitenkin on havainnut, että tietyssä vaiheessa kevättä pääteiden pinta on jo täysin sula ja kuiva kun taas alempiluokkaiset soratiet ovat vielä tasaisen lumi/jääkerroksen peitossa. Eräs arvio on, että sorateiden sulamisen alku tulee noin viikkoa myöhemmin kuin päällystetyillä teillä. Tämä merkitsee sitä, että kun edellä määriteltynä kantavan kerroksen sulamisen alkuhetkeen lisätään seitsemän vuorokautta, saadaan sorateiden sulamisen alkupäivä. Viiveestä on myös se etu, ettei CTI:n laskemiseksi tarvita sääennustetta.

Painorajoitus voidaan periaatteessa poistaa vasta sitten, kun rakenne on täysin sulanut ja se on ehtinyt tiivistyä uudelleen. Veden poistuminen ja tiivistyminen jatkuu hienorakeisilla alusrakenteilla noin kolme viikkoa rakenteen täydellisen sulamisen jälkeen mutta karkeilla alusrakenteilla huomattavasti lyhyemmän aikaa.

Suomessa routa etenee syvälle etenkin Lapissa ja sulaa joskus vasta myöhään kesällä, jolloin painorajoitusajasta voi tulla kohtuuttoman pitkä. Käytännössä alempiluokkaisilla teillä saattaisi olla mahdollista poistaa painorajoitus, kun routa on sulanut noin 1.0 - 1.5 metrin syvyyteen. Pitkän sulamisajan takia voidaan olettaa, että kun kerros on sulanut se alkaa kosteuden vähetessä liikenteen vaikutuksesta tiivistyä, vaikka alapuolinen rakenne on vielä roudassa. Varmuutta painorajoituksen oikeaan poistamishetkeen saadaan siten, että alueelta valitaan koetie, jota mitataan sula-

misaikana säännöllisesti pudotuspainolaitteella ja seurataan taipumaparametrien muuttumista.

Minnesotassa painorajoituksen poistaminen päällystetyillä teillä määritetään syksyn ja kevään kumulatiivisen sademäärän, kevään kumulatiivisen lämpösumman ja edeltävän talven pakkasmäärän avulla. Lisäksi tarvitaan koekohde, josta on tehty pudotuspainolaitemittauksia sulamishetkestä myöhäiseen syksyyn. Pitkä, useina vuosina tehtävä mittausten ja määritysten sarja tarvitaan siksi, että voidaan päätellä taipumaparametreista kyseisen kohteen normaalia kesälujuutta vastaava taso sekä sateen, pakkasmäärän ja lämpösumman vaikutukset tarkasteltavaan taipumaparametriin. Nämä tekijät vaikuttavat jokaiseen koekohteeseen (=tierakenteeseen) omalla tavallaan eikä yleisiä kaavoja voida laatia. Alueella olevan kohteen painorajoitusajan päättymishetkeä voidaan kuitenkin käyttää koko ilmastoalueella. Vastaavaa menettelyä voitaisiin ehkä soveltaa myös Suomessa.

Minnesotassa painorajoitusajan pituuden minimi on neljä viikkoa ja maksimi yleensä alle kahdeksan viikkoa. Sorateiden osalta painorajoitusajan määrittely on tehty tilastollisesti ja se on asetettu kahdeksaksi viikoksi.

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteina oli mm. selvittää Minnesotan painorajoituskäytäntöä, täydentää "Soratiestön runkokelirikko" -raportin aineistoa neljän viimeisen vuoden tiedoilla ja muodostaa täydennetyin aineiston perusteella entistä tarkempi runkokelirikon ennustemalli. Lisäksi raportissa tarkastellaan erilaisten runkokelirikon korjaus- tapojen pitkäaikaistoimivuutta.

Viimeaikaisten Minnesotan painorajoitustutkimusten päämääränä on ollut parantaa ja tarkentaa menetelmää, joiden avulla määritetään painorajoitusten asettamis- ja poistamisajankohdat. Erityisesti painorajoitusten asettamista täsmälleen oikeaan aikaan on pidetty tärkeänä. Oikeana painorajoitusten asettamisajankohtana pidetään hetkeä, jolloin sulaminen on edennyt päällystetyllä tiellä sitomattoman rakenteen yläosaan eli noin 10-15 cm syvyyteen. Ajankohta määritetään mitattujen ilman lämpötilojen ja kolmen vuorokauden ennusteen avulla. Malli sopii myös Suomen olosuhteisiin, kun alueiden sijainnista johtuva ero otetaan huomioon. Esimerkkikohteessa kalibroidulla mallilla ennustetun kantavan kerroksen pinnan sulamishetken virhe oli keskimäärin vain yksi vuorokausi.

Painorajoitukset poistetaan Minnesotassa päällystetyiltä teiltä aikaisintaan neljän ja yleensä enintään kahdeksan viikon kuluttua niiden asettamisesta. Poistamisajankohdan määrittelyssä käytetään hyväksi pudotuspainolaitemittausten taipumaparametreja, kevään lämpösummaa, syksyn ja kevään sadesummaa sekä edeltävän talven pakkasmäärää, joista regressioanalyysin avulla päätellään rakenteen kuormansietokyvyn palautuminen. Sorateilla painorajoitukset poistetaan kahdeksan viikon kuluttua niiden asettamisesta. Menettelyä voitaisiin soveltaa myös Suomessa siten, että ilmasto-alueelta valitaan tie tai teitä ja seurataan pudotuspainolaitteella taipumaparametrien palautumista lähelle kesäarvoja.

Suomea koskevat sää- ja runkokelirikkoinventointitiedot olivat vuosilta 1995 - 2002. Sorateiden kokonaispituus vuonna 2002 oli soratierekisterin mukaan 27 757 km. Rankimpana vuonna 1998 sorateiden runkokelirikkopituus oli yhteensä 1 538 km ja helpoimpana 465 km (v. 2002). Keskimäärin 39 % Suomen sorateista kärsi jonkinasteisesta runkokelirikosta. Vaikeimpia 1-luokan vaurioita oli keskimäärin yhdellä prosentilla, 2-luokan 13 prosentilla ja 3-luokan vaurioita 35 prosentilla sorateista.

Keskimäärin ankarin talvi pakkasmäärän perusteella oli 1995 - 1996 ja leudoin 1999 - 2000. Pakkaskausi alkoi tyypillisesti loka-marraskuun vaihteessa ja päättyi maaliskuun lopulla. Alueittain sulamiskauden alku vaihteli eri vuosina noin 3-4 viikkoa. Tarkasteltujen seitsemän vuoden aikana talven pakkasmäärä ja runkokelirikon määrä eivät korreloineet keskenään.

Kunnostustoimenpiteiden vaikutusta runkokelirikon esiintymiseen selvitettiin vertaamalla runkokelirikkopituutta ennen ja jälkeen kunnostustoimenpiteen. Vertailussa otettiin huomioon tasauskertoimen avulla vuosittaiset runkokelirikkomäärien vaihtelut tiepiireittäin. Yleisesti kaikilla kelirikon kunnostustoimenpiteillä on kelirikkoa vähentävä vaikutus. Suurin ja pitkäikäisin vaikutus on raskaalla runkokelirikkokorjauksella, joka vähensi tyypillisesti kelirikkopituutta yli 75 % vielä neljäntenä vuon-

na toimenpiteen jälkeen. Keskiraskas runkokelirikkokorjaus (B) vähentää kelirikko-pituutta ensimmäisen vuoden jälkeen 67 %, mutta vaikutus heikkenee neljännen vuoden jälkeen 27 prosenttiin. Kevyellä runkokelirikkokorjauksella (C) oli heikohko vaikutus. Kuivatuspuutteiden korjaus vaikuttaa kohtalaisen tehokkaasti ensimmäisen vuoden jälkeen ja vähentää kelirikkopituutta yli 50 %. Vuosien kuluessa vaikutus kuitenkin heikkenee ja se on viiden vuoden kuluttua kunnostustoimenpiteestä enää 24 %.

Runkokelirikkopituutta pyrittiin ennustamaan erilaisilla lämpötiloista ja sademääris-tä lasketuilla tekijöillä. Säätekijät eivät kuitenkaan yksinään riittäneet kuvaamaan runkokelirikon esiintymistä, sillä teiden alusrakenteet, ikä ja rakenne vaikuttavat runkokelirikkomääriin. Tämän takia ennusteessa käytettiin yhtenä selittävänä tekijä-nä alueen keskimääräistä vauriopituutta, jolloin voitiin muodostaa koko Suomea koskeva malli. Mallien parametrit määriteltiin viiden valitun otosalueen tietojen pe-rusteella.

Tulokseksi saatiin kaksi mallia: Syksyn tekijöistä muodostettu malli ja parannettu syksyn ja kevään tekijöistä muodostettu malli. Syksymallin selitysaste oli 70.9 % ja parannetun syksyn ja kevään mallin 88.3 %. Heikommasta selitysasteesta huolimatta syksy -malli sopii ennustamistarkoituksiin, koska sen tekijät ovat tiedossa ennen en-nustettavaa kevättä. Merkittävimmät runkokelirikon rankkuuteen vaikuttavat tekijät olivat routaantumisaika, jolloin pakkasmäärä kasvoi 2 500 Kelvin tunnista - 12 000 Kelvin tuntiin sekä osa-alueen vauriopituuden mediaani, joka otti huomioon alueiden väliset keskimääräiset tien ikä-, rakenne- ja alusrakenne-erot. Lisäksi syk-symallissa oli mukana alueen pitkän ajan pakkasmäärien mediaani sekä vakio.

Ennustemallien toimivuutta testattiin koko Suomen alueella jakamalla Suomi 11 osa-alueeseen, joissa kussakin voidaan runkokelirikkoon vaikuttavien tekijöiden olettaa olevan jokseenkin samankaltaisia. Runkokelirikkomallit toimivat kohtuulli-sen hyvin 11 osa-alueella, vaikka kuuden osa-alueen säämuuttujat laskettiin ympä-röivien osa-alueiden keskiarvoina. Osa-alueiden lukumäärän lisäämistä ja aluerajo-jen tarkentamista kannattaa harkita ainakin rannikkoseutujen osalta. Käytäntöön so-vellettaessa kaikkien osa-alueiden säämuuttujien tulee perustua todellisiin mittauk-siin.

Ennustemallien perusteella luotiin menettely, jonka avulla voidaan ennakoida vuo-sittainen hoitourakka-alueen painorajoituspituus. Painorajoituspituus määritetään kaksivaiheisesti: Ensimmäisessä vaiheessa määritetään osa-alueen 30 vuoden rou-taantumisaikojen perusteella helppo, keskimääräinen ja vaikea runkokelirikkokevät. Ennustettavan kevään rankkuus määräytyy vertaamalla edeltävän syksyn routaantu-misaikaa pitkän ajan routaantumisaikojen jakaumaan. Toisessa vaiheessa määrite-tään hoitourakka-alueen runkokelirikkoinventointeihin perustuvien painorajoituspi-tuuksien jakauma ja jaetaan pituudet luokkiin lyhyt, keskimääräinen ja pitkä. Tule-van kevään runkokelirikkoennusteen perusteella asetetaan hoitourakka-alueen paino-rajoiuspituus joko lyhyeksi, keskimääräiseksi tai pitkäksi. Runkokelirikkoennusteel-la ei voida ennustaa yksittäisen tien runkokelirikkoa vaan tulos koskee tiettyä aluet-ta. Ennusteen perusteella voidaan asettaa hoitourakka-alueen sallittu painorajoituspi-tuus. Lisäksi rankkuusennusteen avulla voidaan tarvittaessa varata lisäkalustoa ja -materiaalia, jos keväästä on tulossa vaikea.

Runkokelirikon ennustemenettelyä joudutaan täydentämään osa-alueiden tilastollisten routaantumisaikamääritysten osalta. Niiden tulee perustua todellisiin mittauksiin, jotka saadaan joko Ilmatieteen laitoksen mittausasemilta tai tiehallinnon tiesääsemilta. Tarkennettu osa-aluejako ja tilastolliset routaantumisaikamääritykset kannattaa tehdä keskitetysti.

Runkokelirikkoennusteen kehittämiseksi kannattaisi selvittää routaantumisaikana saatavilla olevan veden määrää. Tässä tutkimuksessa pyrittiin hyödyntämään sademääriä, mutta haihdunnan ja eriaikaisten sateiden yhteisvaikutus ei ole kovinkaan helposti määritettävissä. Edellisten sijasta kannattaisi hyödyntää joko pohjaveden pinnankorkeus- tai maakosteudenvajausmittauksia, jotka kuvaavat routaantuvaan maahan saatavilla olevan veden määrää.

Tarkennettu osa-aluejako, mittauksiin perustuvat routaantumisaikamääritykset sekä pohjavedenpinnan korkeustiedot toisivat todennäköisesti entistäkin tarkemman mallin ja sitä kautta luotettavamman runkokelirikkoennusteen.

Kirjallisuusluettelo

1. 2002. Mn/DOT Materials & Road Research. Spring Load Restrictions. Technical Fact Sheet. http://www.mrr.dot.state.mn.us/research/seasonal_load_limits/thawindex/tfs_slr.asp
2. Belt, J., Lämsä, V. P., Ehrola, E., Ernvall, T., Seppälä, H. 1999. Soratiestön runkokelirikko. Tielaitoksen tutkimuksia 1/1999. ISBN 9517265468, ISSN 07883706, TIEL 3100021. Helsinki 1999.
3. Embacher, A. R. 2002. Minnesota Seasonal Load Limits. Finland Technology Transfer. Kalvosarja.
4. Saarelainen, S. 2003. Kelirikkoisten teiden painorajoituskäytäntöjen perusteita koskeva muistio 13.06.2003. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka.
5. Stehr, R. A. 2003. Guidelines for Seasonal Load Limit Starting and Ending Dates. Minnesota Department of Transportation. Engineering services. Technical Memorandum No. 03-02-MRR-01.
6. Van Deusen D., Schrader C., Johnson G. 1997. Evaluation of Spring Thaw Load Restriction and Deflection Interpretation Techniques. Eight International Conference on Asphalt Pavements. Volume II Proceedings. 10.14.8.1997. Seattle, Washington. s. 14031419.
7. Van Deusen, D., Schrader C., Bullock D., Worel B. 1998. Recent Research on Springtime Thaw Weakening and Load Restrictions In the State of Minnesota. The 77th Annual meeting of the Transportation Research Board. Paper No. 980621. Washington D.C.

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-128-2
TIEH 3200833